



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN A ESCALA PILOTO DE UN PROTOTIPO DE
SEDIMENTADOR RECTANGULAR”**

PROYECTO DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

GUSTAVO ALEXANDER GUILLÍN MEDINA

JOSÉ LUIS ORTEGA CONTRERAS

GUAYAQUIL-ECUADOR

2018

DEDICATORIA

A Dios, por darme vida y sabiduría.

A mis padres, por saberme formar con valores que prevalecerán por siempre en mi mente. Y por ser las personas más importantes que han estado conmigo en el transcurso de este camino, que hoy se cristaliza.

A todas las personas que me han motivado para poder cumplir un logro más en mi vida.

Gustavo Alexander Guillín Medina

DEDICATORIA

En memoria de mi madre de crianza Gloria de Ortega por su sabiduría, valores y confianza, a mi padre Luis Ortega por su ejemplo de perseverancia y mano dura, a mi madre Rosa Contreras por su paciencia y amor, a mis hermanos Beatriz, Cristhofer, Efraín y Sol por ser la motivación en mi vida.

Finalmente, a mi esposa Linda Quinteros y a mi hijo José Emiliano, por su amor, por su apoyo incondicional y sobre todo por ser la base de todo mi esfuerzo para alcanzar este logro.

José Luis Ortega Contreras.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, al Ph.D. David Matamoros, al Ing. Byron Galarza quienes estuvieron prestos a colaborar en la realización del presente proyecto y a cada uno de los docentes de la Facultad de Ciencias de la Tierra que han aportado a nuestra formación ética y profesional.

Gustavo Alexander Guillín Medina

José Luis Ortega Contreras

TRIBUNAL DE PROYECTO

**Ph.D. Hugo Ernesto Egüez Álava
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

**Ph.D. Miguel Ángel Chávez Moncayo
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA**

**Ph.D. David Enrique Matamoros Camposano
MIEMBRO EVALUADOR**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la
ESPOL)

Gustavo Alexander Guillín Medina

José Luis Ortega Contreras

RESUMEN

Debido a la necesidad de contar con un equipo básico para complementar los conocimientos en la parte sanitaria, se propuso diseñar y construir un Sedimentador Rectangular a Escala Piloto para el laboratorio de Ingeniería Sanitaria.

Para realizar el diseño se procedió a tomar muestras de agua de las lagunas de oxidación de la Espol. Cabe señalar que ninguna de las muestras sirvió para este diseño puesto que contenían sólidos suspendidos como basura en gran cantidad.

La solución planteada, fue tomar muestras de agua del río Guayas esperando sirvan para el diseño, pero lamentablemente debido a la falta de lluvias en el sector las muestras tomadas tenían el mismo problema que las anteriores, no se podía apreciar la clarificación en el ensayo de laboratorio por lo que no se pudo construir la curva de sedimentación necesaria para sacar la velocidad de sedimentación y así proceder con el diseño.

En consecuencia, como última opción se tomaron muestras de suelo que pasaron el tamiz #100 para luego mezclar con agua potable, con distintas concentraciones, y así tener una clara medida en los ensayos. De donde resulta que la concentración ideal fue de 20 gramos por cada litro de agua.

El procedimiento se lo realizó de manera inversa, es decir, aplicamos ingeniería inversa para dimensionar el prototipo. Como se trabaja con un área restringida por la disponibilidad de espacio en el laboratorio, partimos del área para determinar la longitud y altura del sedimentador.

Finalmente, las dimensiones obtenidas fueron: $L=1.5$, $W=0.4$ y $H=0.23$ metros.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	IV
TRIBUNAL DE PROYECTO	V
DECLARACIÓN EXPRESA	VI
RESUMEN	VII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ABREVIATURAS	XIV
SIMBOLOGÍA	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
CAPÍTULO 1	19
INTRODUCCIÓN	19

1.1	Preámbulo	20
1.2	Planteamiento del Problema.....	22
1.3	Hipótesis.....	23
1.4	Objetivos.....	26
1.4.1	Objetivo General.....	26
1.4.2	Objetivos Específicos	26
1.5	Metodología de Estudio	27
CAPÍTULO 2.....		30
PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN.....		30
2.1	Teoría de la Sedimentación.....	31
2.1.1	Conceptos Generales.....	31
2.1.2	Sedimentación de partículas discretas.....	33
2.1.3	Sedimentador de partículas floculentas.....	33
2.1.4	Sedimentación por caída libre e interferida	34
2.2	Factores que afectan el proceso de sedimentación.....	34
2.3	Ensayos de Sedimentación	36
2.3.1	Prueba de Columnas de Sedimentación	36
2.3.2	Cono Imhoff	40
2.4	Diseño del sedimentador rectangular	43
2.4.1	Componentes del sedimentador.....	43
2.4.2	Criterios de diseño.....	44
2.4.3	Dimensionamiento.....	47

2.4.4	Análisis de Sedimentación Retardada.....	47
CAPÍTULO 3	.....	51
METODOLOGÍA	.....	51
3.1	Ensayos de Laboratorio.....	52
3.2	Curvas de sedimentación	54
3.2.1	Curva de sedimentación para concentración de 2 g/l.....	55
3.2.2	Curva de sedimentación para concentración de 5 g/l.....	57
3.2.3	Curva de sedimentación para concentración de 10 g/l.....	59
3.2.4	Curva de sedimentación para concentración de 12 g/l.....	61
3.2.5	Curva de sedimentación para concentración de 15 g/l.....	63
3.2.6	Curva de sedimentación para concentración de 20 g/l.....	65
3.2.7	Curva de sedimentación para concentración de 25 g/l.....	67
3.3	Curva de flujo de sólidos por acción de la gravedad (SFg).....	69
3.4	Diseño de sedimentador rectangular	70
3.4.1	Dimensionamiento con una concentración de 2 g/l	71
3.4.1.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	71
3.4.1.2	Diseño de pantalla difusora.....	73
3.4.2	Dimensionamiento con una concentración de 5 g/l	74
3.4.2.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	74
3.4.2.2	Diseño de pantalla difusora.....	76
3.4.3	Dimensionamiento con una concentración de 10 g/l	77
3.4.3.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	77

3.4.3.2	Diseño de la pantalla difusora	79
3.4.4	Dimensionamiento con una concentración de 12 g/l	81
3.4.4.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	81
3.4.4.2	Diseño de la pantalla difusora	83
3.4.5	Dimensionamiento con una concentración de 15 g/l	84
3.4.5.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	84
3.4.5.2	Diseño de la pantalla difusora	86
3.4.6	Dimensionamiento con una concentración de 20 g/l	87
3.4.6.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	87
3.4.6.2	Diseño de la pantalla difusora	89
3.4.7	Dimensionamiento con una concentración de 25 g/l	91
3.4.7.1	Dimensionamiento exterior del proyecto	91
3.4.7.2	Diseño de la pantalla difusora	93
3.5	Ensayo cono Imhoff (Sólidos sedimentables)	94
CAPÍTULO 4	.....	96
ANÁLISIS DE RESULTADOS	.....	96
4.1	Análisis de la velocidad de sedimentación.....	97
4.2	Análisis del tiempo de retención	98
4.3	Análisis de la carga hidráulica sobre el vertedero de salida	99
CAPÍTULO 5	.....	101
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	101

CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
SS	Sólidos Suspendidos
NTU	Unidad Nefelométrías de Turbiedad
SVI	Índice de Volumen de Sólidos
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
MLSS	Sólidos Suspendidos de Licor Mezclado
SST	Sólidos Suspendidos Totales

SIMBOLOGÍA

G	Aceleración de la Gravedad
h_0	Altura de la Columna de Sedimentación
H	Altura de Sedimentador
H_u	Altura a la cual todos los sólidos se encuentran
Q	Caudal
v	Velocidad
v_s	Velocidad de sedimentación
V	Volumen
V_{LODO}	Volumen de Lodo
q	Carga hidráulica
g/l	Gramo por litro
SFg	Flujo de sólido por acción de la gravedad
l/s.m	Litro sobre segundo por metro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.	21
Figura 1.3 Mortero con lodo pulverizado.	24
Figura 1.4 Concentración de 5 gramos de Lodo seco.	25
Figura 1.5 Curva de Sedimentación.	28
Figura 1.6 Cono Imhoff.	29
Figura 2.1 Curva de Sedimentación.	32
Figura 2.3 Fuerzas actuantes en una partícula.	36
Figura 2.4 Curva de Sedimentación.	38
Figura 2.5 Altura de la interfase del lodo como una función del tiempo en una prueba VZS.	39
Figura 2.6 Tipo de Sedimentación.	40
Figura 2.7 Cono Imhoff.	41
Figura 2.8 Interpretación del Índice SVI.	43
Figura 2.9 Simulación de Sedimentación.	44
Figura 2.10 Curva H vs T.	48
Figura 2.11 Curva Fs vs C.	49
Figura 3.1 Lodo húmedo del río Los Tintos.	52

Figura 3.2 Lodo seco antes de pulverizar.	53
Figura 3.3 Lodo seco pulverizado.	53
Figura 3.4 Columnas de sedimentación.....	54
Figura 3.5 Curva de sedimentación para 2 g/l.....	56
Figura 3.6 Curva de sedimentación para 5 g/l.....	58
Figura 3.7 Curva de sedimentación para 10 g/l.....	60
Figura 3.8 Curva de sedimentación para 12 g/l.....	62
Figura 3.9 Curva de sedimentación para 15 g/l.....	64
Figura 3.10 Curva de sedimentación para 20 g/l.....	66
Figura 3.11 Curva de sedimentación para 25 g/l.....	68
Figura 3.12 Curva de flujo de sólidos.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Datos obtenidos para 2g/l.....	55
Tabla II. Datos obtenidos para 5 g/l.....	57
Tabla III. Datos obtenidos para 10 g/l.....	59
Tabla IV. Concentración de 12 g/l.	61
Tabla V. Datos obtenidos para 15 g/l.	63
Tabla VI. Datos obtenidos para 20 g/l.	65
Tabla VII. Datos obtenidos para 25 g/l.	67
Tabla VIII. Valores de SFg	69
Tabla IX. Resultados de SVI	95
Tabla X. Comparación de velocidades de sedimentación con rangos de diseño.	97
Tabla XI. Comparación del tiempo de retención con rangos de diseño.....	98
Tabla XII. Comparación de carga hidráulica sobre vertedero de salida con rango de diseño.	99

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

Los sedimentos en las aguas residuales generan un gran problema a la hora de tratar dichas aguas, es por eso que el sedimentador es una alternativa muy importante debido a su diseño sistemático que permite retener la mayor parte de los sedimentos que pasan por su cuerpo.

Existen dos tipos de sedimentadores, el primario que permite disolver de una manera rápida los residuos, ya sean estos, sólidos o materia flotante; la idea es minimizar la concentración de los SS. Mientras que el sedimentador secundario remueve la biomasa y los sólidos suspendidos que el primario no pudo remover.

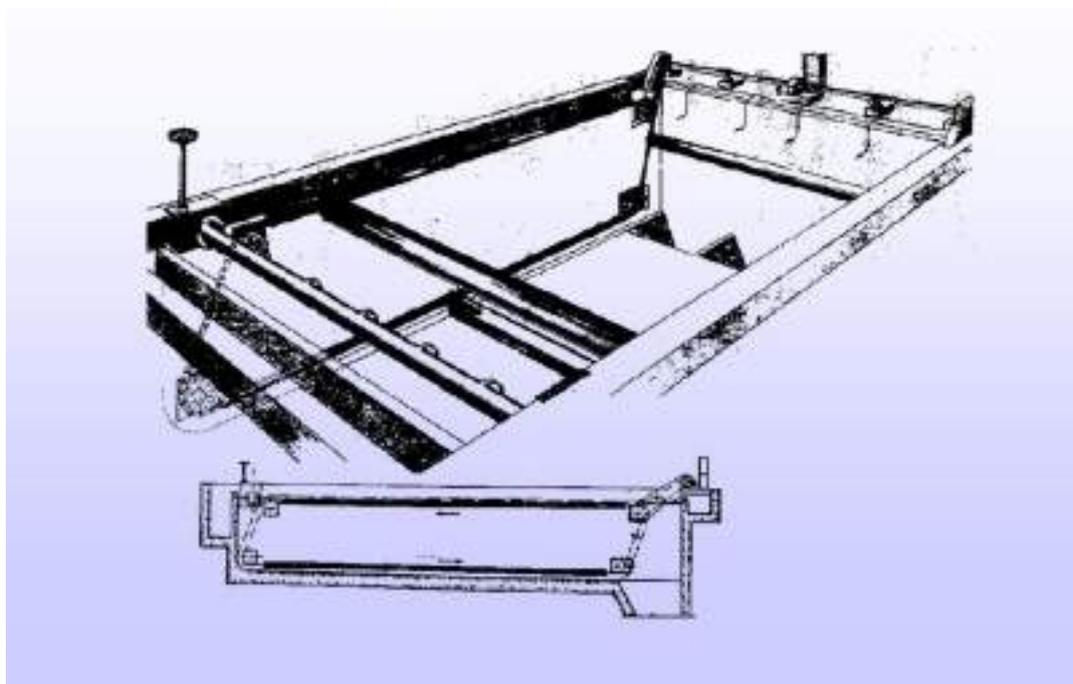


Figura 1.1 Sedimentador Primario Rectangular.
Fuente: Cortés, I., 2003.

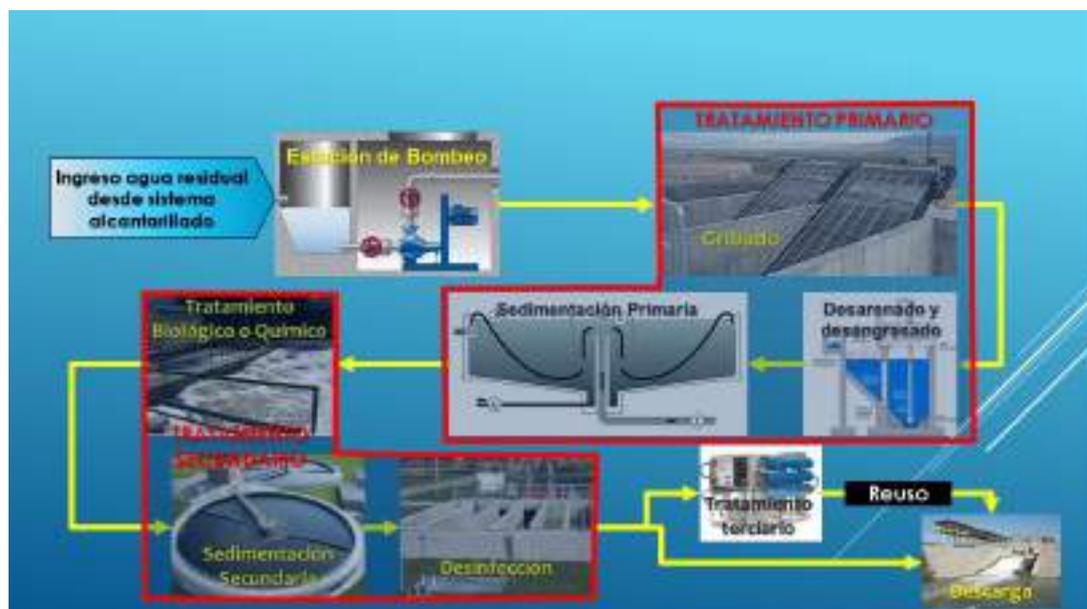


Figura 1.2 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
Fuente: Matamoras, D., 2017.

Este proyecto se enfoca más en el diseño de un prototipo de sedimentador rectangular, así como su construcción a escala piloto para uso de cátedra en el laboratorio, pero se espera que pueda ser utilizado como ambos, es decir, este diseño puede ser considerado, tanto como un sedimentador primario como secundario.

La sedimentación no es nada más ni nada menos que un proceso que influye en el estilo hidráulico de los sistemas hídricos.

Ecuador es uno de los países que no se acostumbra a realizar investigaciones detalladas respecto a este tema, por lo menos no se logró contar con documentos a fines a este tema en el Ecuador, solo una que otra tesis que lo tratan superficialmente.

En este proyecto de grado se argumentará de forma detallada el diseño de un sedimentador rectangular o convencional. Para este diseño se recolectó muestras de agua de los siguientes sitios:

1. Agua residual de la Espol antes de ser vertida a las lagunas de oxidación.
2. Agua del Río Daule en el Malecón 2000 de la ciudad de Guayaquil.
3. Agua residual preparada artificialmente (añadiendo suelo fino pasante del tamiz #100 a agua de la llave) con diferentes tipos de concentración.
4. Agua y Lodo del Río Los Tintos del Cantón Salitre. El lodo se lo hizo secar para realizar el ensayo con diferentes concentraciones, tal como se hizo con el suelo fino.

1.2 Planteamiento del Problema

El lugar donde se observó la falta de un prototipo de sedimentador fue el laboratorio de Ingeniería Sanitaria; este laboratorio posee una gama de artefactos, recipientes y materiales para el aprendizaje de las materias de Tratamiento y Distribución de Agua Potable, Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Residuales y la materia itineraria de Manejo de Aguas Residuales.

En los últimos años se ha hecho gestiones para dotar al laboratorio de equipos necesarios, con el fin de mejorar y sobre todo beneficiar al

estudiante para que lleve la teoría vista en el aula de clases a la práctica de una manera más didáctica con equipos de primer nivel.

A pesar de lo mencionado anteriormente se pudo constatar que hacía falta un equipo muy elemental y necesario para la práctica de los estudiantes; este equipo faltante era un sedimentador donde los estudiantes puedan ver claramente cómo se comportan los sedimentos en las diferentes aguas, ya sean residuales o para uso de potabilización.

Acorde a la necesidad de dicho aparato se procedió a proponerlo como tema de proyecto integrador que beneficiará a futuros estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil.

1.3 Hipótesis

El proyecto se desarrolla con una investigación exhaustiva de diferentes muestras de agua, de las 4 opciones tomadas de diferentes lugares, se eligió la última, es decir las muestras de la opción #4, que trata sobre tomar lodo seco para colocar en un litro de agua diferentes concentraciones.

Como podemos apreciar en la figura 1.3, el lodo se lo colocó en el mortero para convertirlo en polvo y así poder tener una concentración que pueda ser homogeneizada con el agua potable.



Figura 1.3 Mortero con lodo pulverizado.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Se eligió esta muestra debido a que se consideró como la más óptima después de los diferentes ensayos de laboratorio realizados, puesto que con diferentes concentraciones se pudo ver la clarificación y tomar datos con los cuales se generaron las diferentes curvas de sedimentación. Cabe recalcar que la muestra de la opción #3 también fue una buena opción debido a que fue la primera muestra en la que se utilizó diferentes tipos de concentraciones, el suelo fino pasante del tamiz #100 se obtuvo del laboratorio de suelos de la Espol.

Se pesó de acuerdo a las siguientes concentraciones: 2, 5, 10, 12, 15, 20 y 25 gramos, la figura 1.4 muestra una de las concentraciones en el momento de ser pesada.



Figura 1.4 Concentración de 5 gramos de Lodo seco.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

De los estudios realizados se buscó determinar específicamente curvas de sedimentación de partículas, con un peso que permite sedimentarse, presentes en el las muestras recolectadas de agua, aunque este cuerpo de agua se lo realiza de forma artificial, por así decirlo, debido a que se

mezcla diferentes concentraciones de lodo seco del Río Los Tintos con agua potable.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar un equipo de sedimentación, para uso de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela superior Politécnica del Litoral.

Diseñar y construir a escala piloto un sedimentador rectangular a partir de la opción más apropiada de las 4 tomadas en diferentes partes antes descritas.

Se plantea que los datos obtenidos sirvan de la mejor manera para ser utilizados en diseños de futuros prototipos de sedimentadores en proyectos de tratamiento a escala o el perfeccionamiento de este proyecto.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar 4 opciones de muestras de agua de diferentes procedencias, realizando el ensayo de sedimentación.
- Conocer la concentración de ST en las muestras de agua.

- Obtener curvas de sedimentación para determinar la velocidad de sedimentación de la muestra elegida para el diseño.
- Observar problemas generados en el proceso de análisis, para dar una solución óptima para futuros estudios de columna de sedimentación.

1.5 Metodología de Estudio

Para el diseño de este proyecto se utilizaron dos ensayos en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria:

- Columnas de Sedimentación
- Sólidos Sedimentables

A partir de estos ensayos se pudo determinar diferentes parámetros de importancia alta para el diseño del sedimentador convencional. Mediante la curva se trazó una pendiente para obtener el valor de la velocidad de sedimentación y mediante fórmulas presentadas posteriormente se procedió con un diseño a la inversa, puesto que en este trabajo no se cuenta con un caudal como dato.

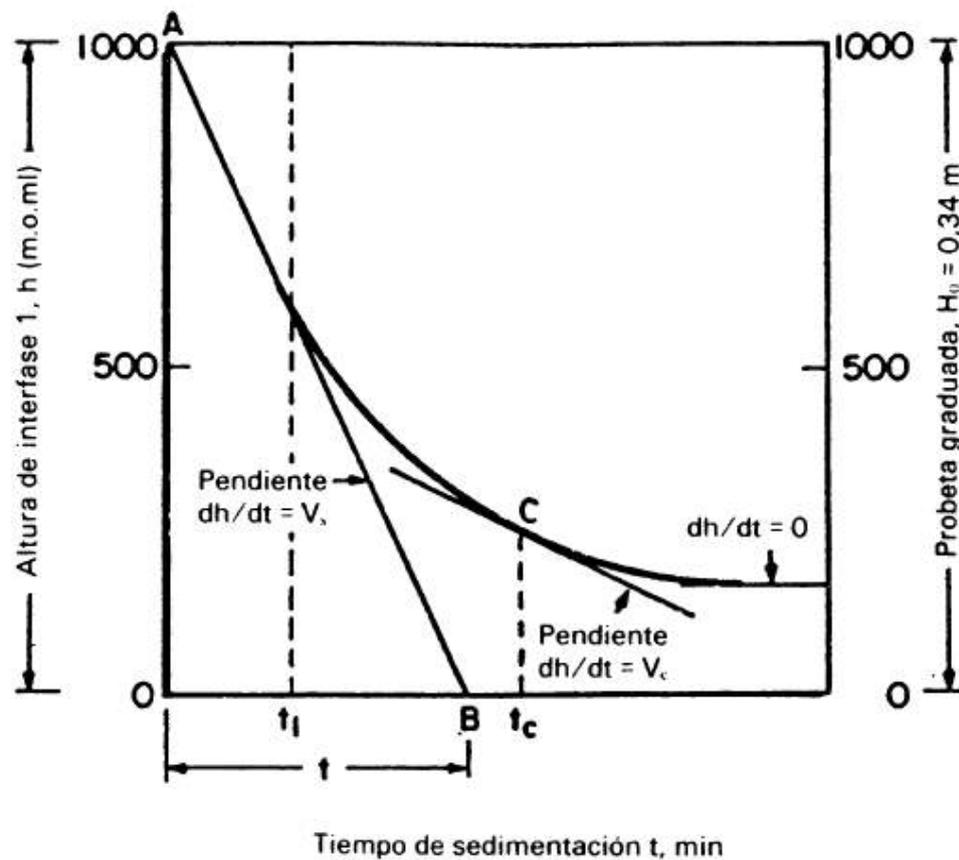


Figura 1.5 Curva de Sedimentación.
Fuente: CEPIS, 1992.

Normalmente un diseño de un sedimentador convencional se parte de dos datos principales, la pendiente de la curva sedimentación y el caudal. A partir de estos dos datos, con un proceso de cálculos y fórmulas ya determinadas se obtiene un área para el sedimentador; en este caso como es un sedimentador a escala hay que tener en cuenta el área disponible en el laboratorio, no podemos partir de un caudal debido a que el área es limitada.

Es por eso que este proyecto de grado parte del área disponible donde se espera colocarlo una vez construido. El proceso es el mismo, pero de forma inversa, en vez de partir con la velocidad de sedimentación y el caudal, partimos del área disponible.

Para calcular el índice de volumen de sólidos (SVI) se tuvo que realizar el ensayo de Sólidos Sedimentables, en este ensayo se utilizó el cono Imhoff que consiste en verter en el cono la concentración en un litro de agua perfectamente homogeneizada, el tiempo en el cual se toma la medida es a los 30 minutos.

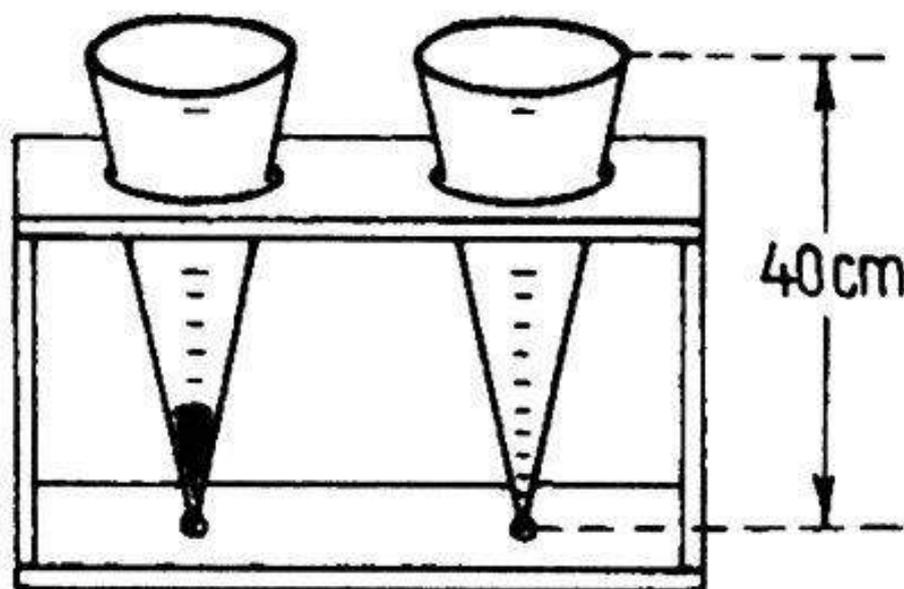


Figura 1.6 Cono Imhoff.

Fuente: Bestimmung, M., 2003.

CAPÍTULO 2

PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN

2.1 Teoría de la Sedimentación.

2.1.1 Conceptos Generales

La sedimentación, según la literatura revisada, es un proceso donde las partículas, de un determinado cuerpo de agua, caen por el fenómeno de la gravedad. Obviamente estas partículas deben de tener un peso específico mayor a la de agua. (Maldonado, 2002).

Existen dos procesos que se complementan el uno con el otro, el primero es la sedimentación y el otro es la filtración. La sedimentación se encarga de remover todas las partículas que tienen un peso mayor que el del agua, mientras que la infiltración soluciona el problema de las partículas han sido resuspendidas y al tener un peso parecido o menor al del fluido no pudieron ser tratadas con el primer proceso. (Pérez, 1978)

El proceso de sedimentación es un fenómeno físico donde su función fundamental es clarificar el agua, este fenómeno se lo utiliza para plantas de tratamiento de agua potable o residuales. (Maldonado, 2002).

La sedimentación de las partículas depende específicamente de su forma y peso, es decir una partícula más pesada caerá por gravedad de una manera más rápida que una partícula con un

peso menor a esta. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre interferida. (Arboleda, 2000).

El proceso de sedimentación se presenta en la figura 2.1. Las partículas en suspensión se asientan en condiciones de reposo relativo e involucran 4 fases que se producen de manera simultánea o no.

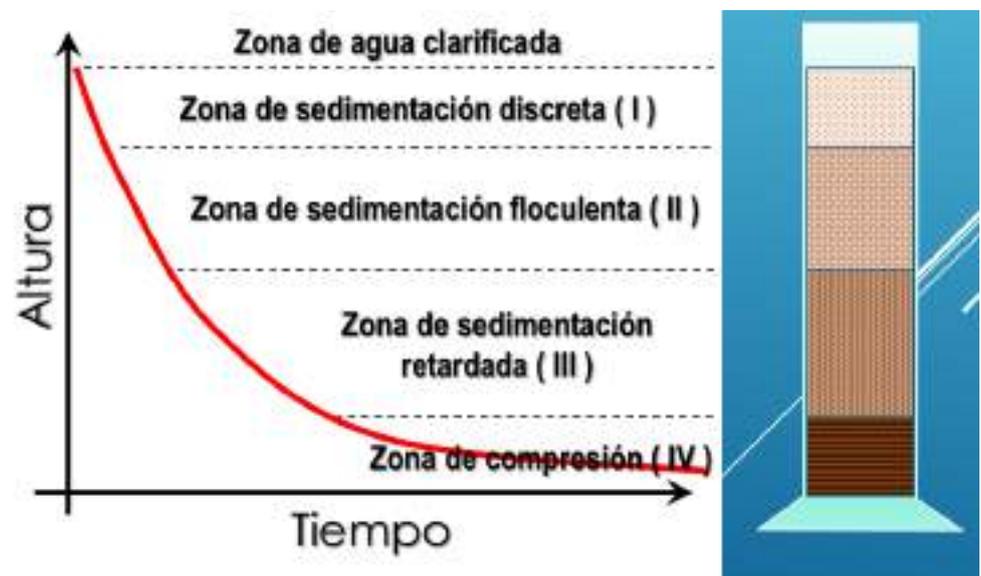


Figura 2.1 Curva de Sedimentación.

Fuente: Matamoros, D., 2017.

La pendiente de la curva representa la velocidad de sedimentación en dicho punto. Con este dato se puede

determinar los parámetros que servirán para el diseño del sedimentador con la muestra de lodo seco que es con la que se va a trabajar en este documento.

2.1.2 Sedimentación de partículas discretas.

Se entiende por partículas discretas a todas aquellas que no modifican sus características; ya sea su forma, tamaño o densidad; durante su sedimentación. También se la conoce como sedimentación simple al proceso de depósito de dichas partículas. (Maldonado, 2002).

Las partículas antes mencionadas se las encuentra en desarenadores o sedimentadores, por consiguiente, se puede observar en los presedimentadores que son los que están previo a la coagulación en plantas de filtración rápida y lenta.

2.1.3 Sedimentador de partículas floculentas.

Las partículas de esta sección son el resultado por la acumulación de partículas coloides desestabilizadas debido a la aplicación de agentes químicos. Estas partículas modifican su característica durante su caída. (Arboleda, 2000).

2.1.4 Sedimentación por caída libre e interferida

La concentración de partículas influye en el proceso de sedimentación, es decir, cuando la concentración de partículas en el agua es baja tienden a depositarse sin interferir, a esto es lo que se llama caída libre. (Maldonado, 2002).

En cambio, cuando la concentración de partículas en el agua es alta, se producen colisiones que provocan que estén fijadas entre sí y se sedimenten de manera masiva en vez de ser individual, a este procedimiento se lo conoce como sedimentación interferida o sedimentación zonal. (Arboleda, 2000).

Este tipo de sedimentación la encontramos en los concentradores de lodos.

2.2 Factores que afectan el proceso de sedimentación

Existen diversos factores que afectan el proceso de sedimentación, antes de dar algunos ejemplos debe quedar en claro que los sedimentadores forman parte de una planta de tratamiento de aguas residuales, en la figura 2.2 se aprecia un ejemplo del proceso de sedimentación en una planta de tratamiento.

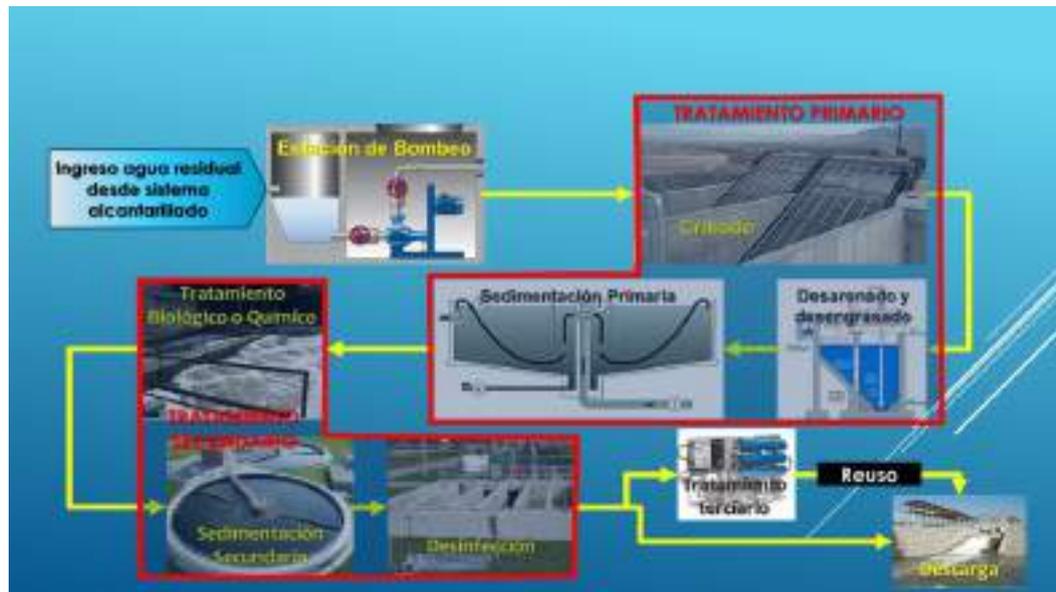


Figura 2.2 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Fuente: Matamoros, D., 2017.

Una vez aclarado superficialmente las partes de una planta de aguas residuales se procede a citar los factores que afectan el proceso de sedimentación:

- Tamaño de la partícula. En palabras simples quiere decir que las partículas grandes y más densas se sedimentan más rápido.
- Temperatura. Si la temperatura decrece entonces la tasa de sedimentación disminuye, esto también indica que el tiempo de retención hidráulica debe aumentar o la dosis del floculante debe ser corregida.
- Corrientes debido a diferencias de densidad y corrientes Eddy (turbulencias) podrían cambiar el patrón de sedimentación en el tanque sedimentador.

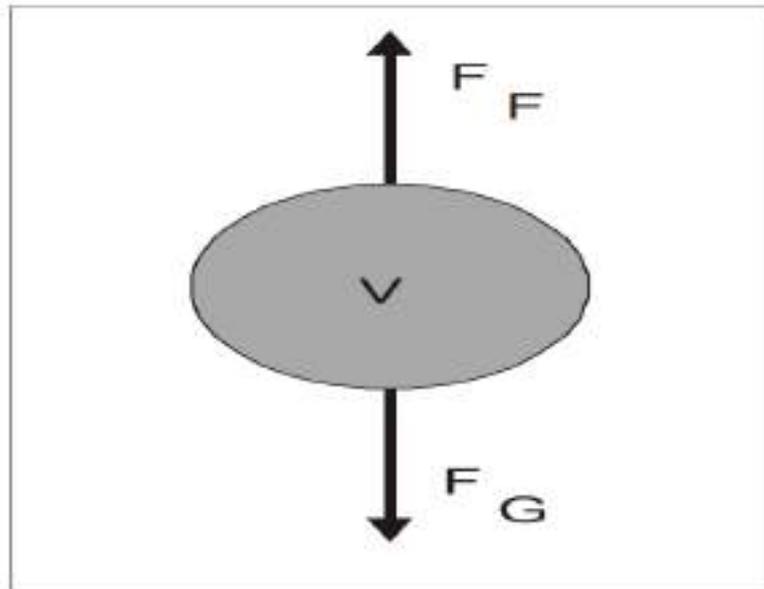


Figura 2.3 Fuerzas actuantes en una partícula.
Fuente: Maldonado, J., 2002.

2.3 Ensayos de Sedimentación

2.3.1 Prueba de Columnas de Sedimentación

Este ensayo consiste en colocar el agua de un sitio en específico en una probeta de un litro, en este proyecto se va a tomar diferentes concentraciones de lodo seco tomado del Río Los tintos. Las concentraciones que se tomaron fueron las siguientes:

- 2000 mg
- 5000 mg
- 10000 mg
- 12000 mg
- 15000 mg

- 20000 mg
- 25000 mg

Cada concentración se la mezcló en una probeta con 1 litro de agua potable, se hicieron movimientos con el objetivo de homogeneizar la muestra a cada concentración.

Los datos tomados dependían del tiempo detallado a continuación, cabe señalar que se usaron los mismos tiempos para cada concentración:

- 1 min
- 2 min
- 5 min
- 10 min
- 15 min
- 30 min
- 45 min
- 60 min
- 120 min
- 180 min
- 240 min
- 300 min

- 360 min
- 420 min

Se realizó una tabla donde el tiempo representaba el eje “X” y la altura de interfase agua – lodo correspondía al eje de las “Y”. Con estos puntos se pudo realizar la curva de sedimentación que servirá posteriormente para calcular la velocidad de sedimentación en un tiempo determinado.

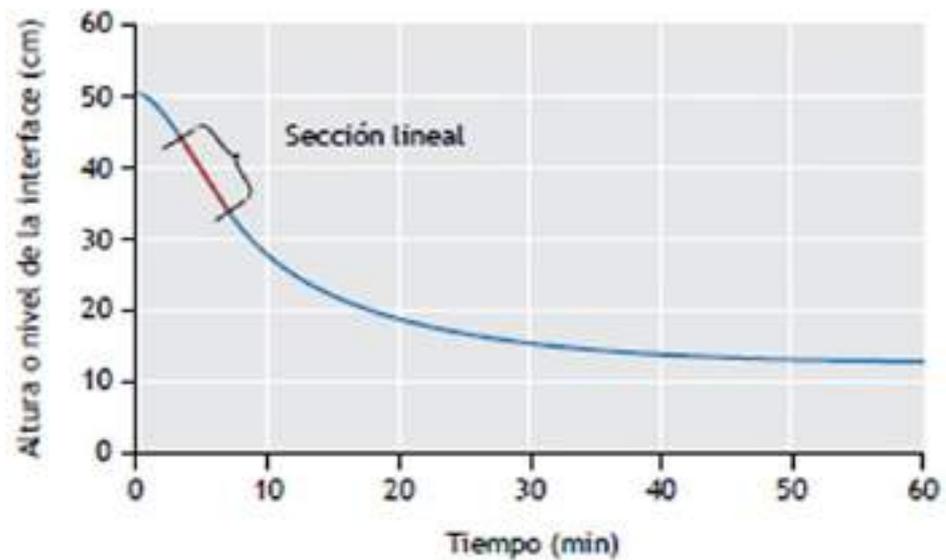


Figura 2.4 Curva de Sedimentación.

Fuente: Henze, 2017.

En la figura 2.4 se puede apreciar la progresión de la prueba de velocidad de sedimentación por zona a 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 45 minutos. Este ensayo lo realizó un laboratorio en Canadá. A

continuación, en la figura 2.5, se puede observar las probetas en diferentes tiempos, donde se observa con facilidad la clarificación. La altura se la toma precisamente en la interfase lodo – agua, con esta altura se obtiene un punto en ese tiempo; así se realiza en los tiempos mencionados, para construir la curva de la figura 2.4.

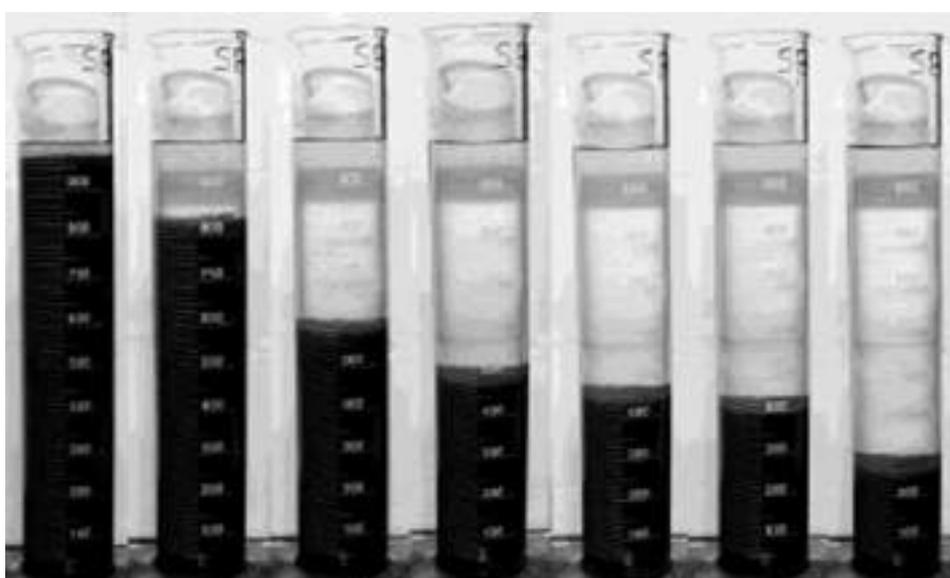


Figura 2.5 Altura de la interfase del lodo como una función del tiempo en una prueba VZS.

Fuente: Henze, 2017.

La aplicación de la curva de sedimentación en el diseño de plantas de tratamientos depende del tipo de sedimentación, en la figura 2.6 se tiene de forma detallada el tipo de sedimentación y su respectiva aplicación.

Tipo de Sedimentación	Aplicación
Partículas Discretas (Tipo I)	Eliminación de Arenas (Desarenado)
Floculenta (Tipo II)	Eliminación de Sólidos en Suspensión en tanques de Sedimentación Primaria y en parte superior de tanques de Sedimentación Secundaria
Retardada o Zonal (Tipo III)	Tanques de Sedimentación Secundaria
Compresión (Tipo IV)	Capa de lodo en los decantadores secundarios y en el espesado de lodos.

Figura 2.6 Tipo de Sedimentación.

Fuente: Matamoros, D., 2017.

2.3.2 Cono Imhoff

Este ensayo consiste en colocar una concentración definida en un litro de agua, homogeneizarla y finalmente colocarla en un cono llamado Imhoff. En la figura 2.7 se puede apreciar con detalle este recipiente.



Figura 2.7 Cono Imhoff.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Luego de ser colocado en el recipiente se toma la medida de sedimentación, en este proyecto nos sirve el dato a los 30 minutos, puesto que para hacer el análisis de volumen de sólidos se necesita la medida a ese tiempo. La fórmula para el SVI que se utiliza es la siguiente:

$$SVI = 1000 \frac{V_{\text{lodo}}}{MLSS * V} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

- SVI: Sludge Volume Index (*ml/g*).
- V_{lodo} : Volumen de lodo del ensayo (*ml*).
- V: Volumen total de agua residual ensayada (*l*).
- MLSS: Concentración de licor mezclado del ensayo (*mg/l*).

Si el lodo reflota antes de 2 horas, hay evidencia de:

- Falla de operación del clarificador.
- Exceso de nitrato y DBO en MLSS.
- Poco oxígeno en el reactor de aeración.

El SVI básicamente es un indicador de características de sedimentación de los lodos activados en el clarificador final (sedimentación secundaria). El índice se expresa en ml/g, y la calidad del lodo se evalúa de acuerdo a la siguiente escala:

SVI	Descripción
≤ 80	Lodo denso rápidamente sedimentable. Lodo típico de reactores de aireación extendido (sobre – oxidados).
100 – 200	Lodo considerado de buena calidad que sedimenta más lentamente y así atrapa más materia orgánica
≥ 200	Lodo que sedimenta muy lentamente y que no es muy denso. El alto valor de SVI podría indicar lodo filamentoso y abultado (bulking)

Figura 2.8 Interpretación del Índice SVI.

Fuente: Matamoras, D., 2017.

El tipo de sistema depende de la edad del lodo, el sistema convencional tiene entre 3 y 10 días, mientras que el sistema de aeración extendida fluctúa por los 15 y 30 días.

2.4 Diseño del sedimentador rectangular

2.4.1 Componentes del sedimentador

Se puede dividir en 4 partes o zonas, cada una con un fin determinado en su operación.

Zona de entrada: Estructura hidráulica de transición, que permite disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad longitudinal uniforme de igual intensidad y dirección dentro del sedimentador.

Zona de Sedimentación: Debe constar de una cámara con volumen y condiciones de flujo adecuados que permita la sedimentación de las partículas. Debe estar libre de influencias de las otras zonas.

Zona de salida: Contribuye a que se dé un tránsito suave entre la zona de sedimentación y el flujo de salida, sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas. Constituida por vertederos, canaletas o tubos perforados.

Zona de lodos: Recibe el material sedimentado que debe ser drenado posteriormente, ya sea a través de una tubería o por sistemas mecánicos.

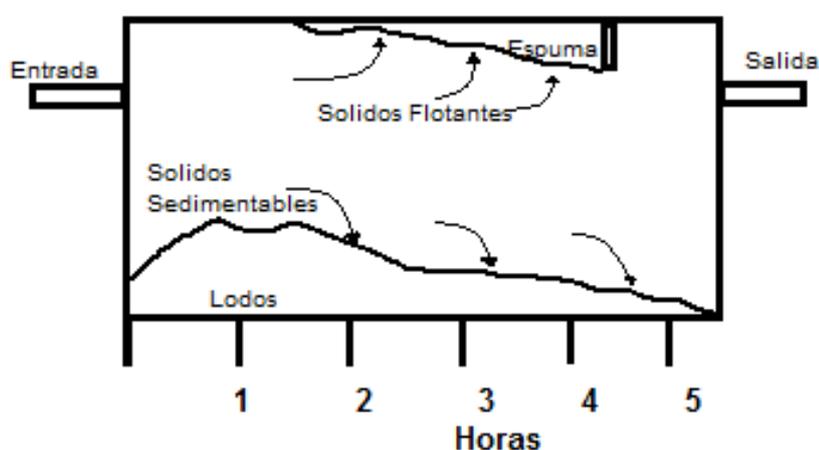


Figura 2.9 Simulación de Sedimentación.
Fuente: Arboleda, 2000.

2.4.2 Criterios de diseño

A continuación se mencionan los criterios de diseño que se aplicaron para el dimensionamiento del prototipo de sedimentador rectangular a escala (OPS/CEPIS/05.158. UNATSABAR, 2005). En algunos criterios, al tener rangos

grandes, se optó por hacer una relación en función de las medidas que se tienen establecidas.

- El tiempo de retención hidráulica estará comprendido alrededor de 1 hora a 3 horas.
- La carga hidráulica, bordea los valores de 2 a 10 $m^3/m^2 \cdot día$.
- La profundidad del tanque comprende el rango de 1.5-2.5 metros.
- La relación L/B, largo – ancho, varía entre 3-6.
- La relación L/H, largo – profundidad comprende al rango de 5 a 20.
- La base del sedimentador debe contar con una pendiente de 5 a 10%, hacía la tubería o compuerta de salida, gracias a esta inclinación el lodo del fondo se desliza fácilmente.
- La velocidad del agua entre los orificios diseñados no deberá ser superior a 0.15 metros sobre segundos; gracias al control de este parámetro se evita alteraciones en una zona de gran importancia, la zona de sedimentación.

- La carga hidráulica sobre el vertedero en la salida debe cumplir con ser menor o igual a 3 litros sobre segundo por metro.
- Se procede a efectuar experimentalmente la determinación del volumen máximo de lodo que se va a producir.
- La eliminación de lodos se recomienda depositarlo en el primer tercio del tanque, debido a que el 80% del lodo se sedimenta en esa zona.
- Se tiene que perforar los agujeros en un ángulo de 15 grados aproximadamente en el sentido del flujo.
- La pantalla difusora estará entre 0.7 a 1.00 metros de distancia de la pared de entrada.
- Los agujeros más altos de la pantalla difusora van a estar a una distancia de $\frac{1}{5}$ o $\frac{1}{6}$ de la altura (H) a partir de la superficie del agua y los que están en la parte inferior estarán entre $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{5}$ de la altura (H) a partir de la superficie del fondo. Cabe señalar que conviene realizar muchas perforaciones, con el fin de disminuir la longitud de los chorros de agua, para no crear alteraciones en la zona de sedimentación.

2.4.3 Dimensionamiento

El dimensionamiento para el diseño del tanque de sedimentación, se lo detalla paso a paso en la sección 3.4, de igual manera ahí se establecen las ecuaciones necesarias para su análisis, tomando en consideración los criterios de diseño antes mencionados.

2.4.4 Análisis de Sedimentación Retardada

La velocidad de sedimentación en la zona retardada es función de la concentración de sólidos, a este proceso se lo denomina Análisis Tipo Batch. Para este análisis se considera la curva de sedimentación construida con la altura de clarificación y el tiempo.

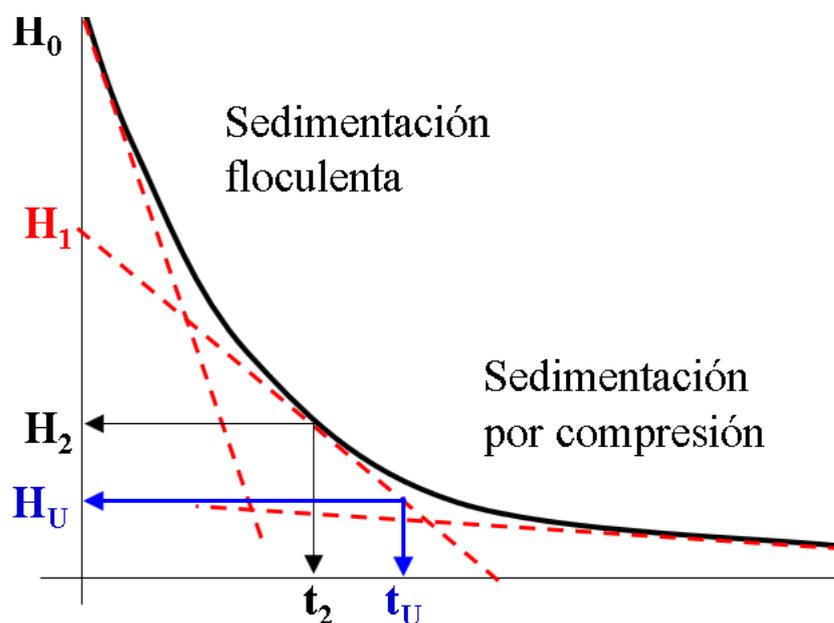


Figura 2.10 Curva H vs T.
Fuente: Matamoros, D., 2017.

Con la gráfica anterior, se puede calcular el área del sedimentador con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Qt_U}{H_0} \quad \text{Ec. 2}$$

En este proyecto ya tenemos un área predefinida, dispuesto por la restricción del mesón donde estará el prototipo.

Existe otra manera de determinar el área del sedimentador utilizando el flujo de sólidos y la concentración. A este proceso se lo conoce como Análisis de Flujo de Sólidos que se lo podría explicar cómo el flujo descendente de lodo en el interior del tanque de sedimentación debido a gravedad y a la extracción de lodos en el fondo (bombeo).

Cuando no se tiene la velocidad de bombeo, pero si la concentración de bombeo C_b . El procedimiento es el siguiente:

- 1) Graficar el flujo de sólidos gravitacional.
- 2) Definir la concentración esperada de lodos a ser recirculados.
- 3) Trazar una tangente a la curva desde la concentración esperada.
- 4) Obtener el flujo limitante de sólidos.
- 5) Obtener el punto de intersección definido por el flujo limitante y la concentración de lodos.
- 6) Obtener la velocidad de recirculación.

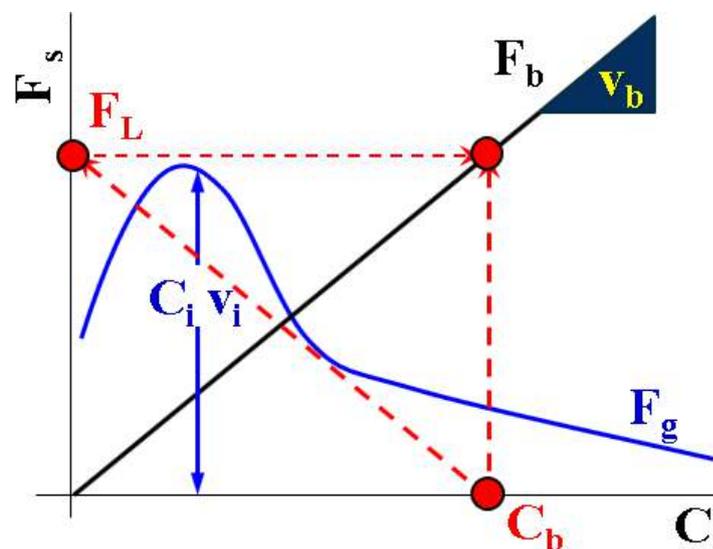


Figura 2.11 Curva F_s vs C .
Fuente: Matamoros, D., 2017.

En este proyecto de grado se lo trabaja como tipo batch debido a que el diseño propuesto no va a tener bomba ni flujo continuo, pero cabe señalar que se deja constancia para añadirlo más adelante cuando el docente de la materia lo considere trabajar como flujo continuo.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se presenta sistemáticamente el procedimiento que se siguió para lograr cumplir con los objetivos propuestos, desde la obtención de las muestras, así como su preparación, hasta el dimensionamiento del sedimentador rectangular para su construcción a escala.

3.1 Ensayos de Laboratorio

Para los ensayos realizados, se tomaron muestras de lodo seco con diferentes concentraciones que fueron descritas previamente.

Debido a que después de 4 días de secar el lodo, éste se puso un poco duro, por lo que se tuvo que poner las partes grandes en el mortero y así pulverizarlo.



Figura 3.1 Lodo húmedo del río Los Tintos.

Fuente: Guillín, G., Ortega J., 2017.



Figura 3.2 Lodo seco antes de pulverizar.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.



Figura 3.3 Lodo seco pulverizado.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Una vez obtenido el lodo seco pulverizado, se lo colocó en diferentes probetas, a ciertas concentraciones, con agua de la llave para luego homogeneizarla y proceder a tomar las alturas de interfase en determinados tiempos.

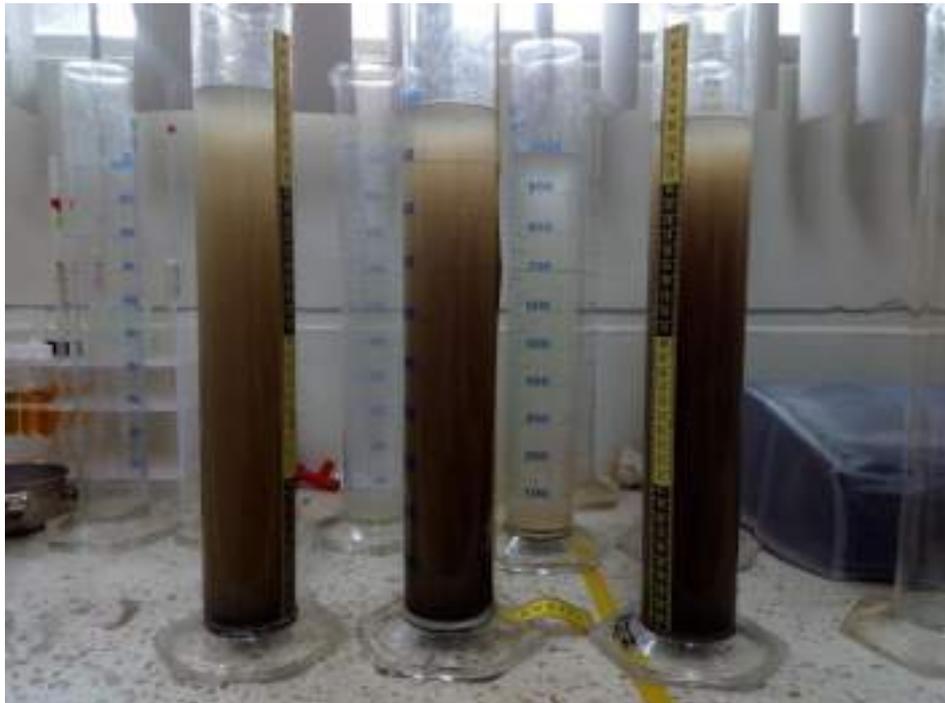


Figura 3.4 Columnas de sedimentación.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

3.2 Curvas de sedimentación

Con los datos obtenidos en las columnas de sedimentación, se puede obtener una curva h (altura de interfase) vs t (tiempo de sedimentación), llamada curva de sedimentación. Luego se determinó la velocidad de

sedimentación de las partículas, de dicha curva, esto para cada concentración utilizada.

A continuación, se muestran las curvas y velocidades de sedimentación, a partir de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, para cada concentración.

3.2.1 Curva de sedimentación para concentración de 2 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla I. Datos obtenidos para 2 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,32
2	0,30
5	0,26
10	0,22
15	0,20
30	0,17
45	0,145
60	0,125
120	0,07
180	0,03
240	0,01
300	0,01
360	0,01
420	0,01

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

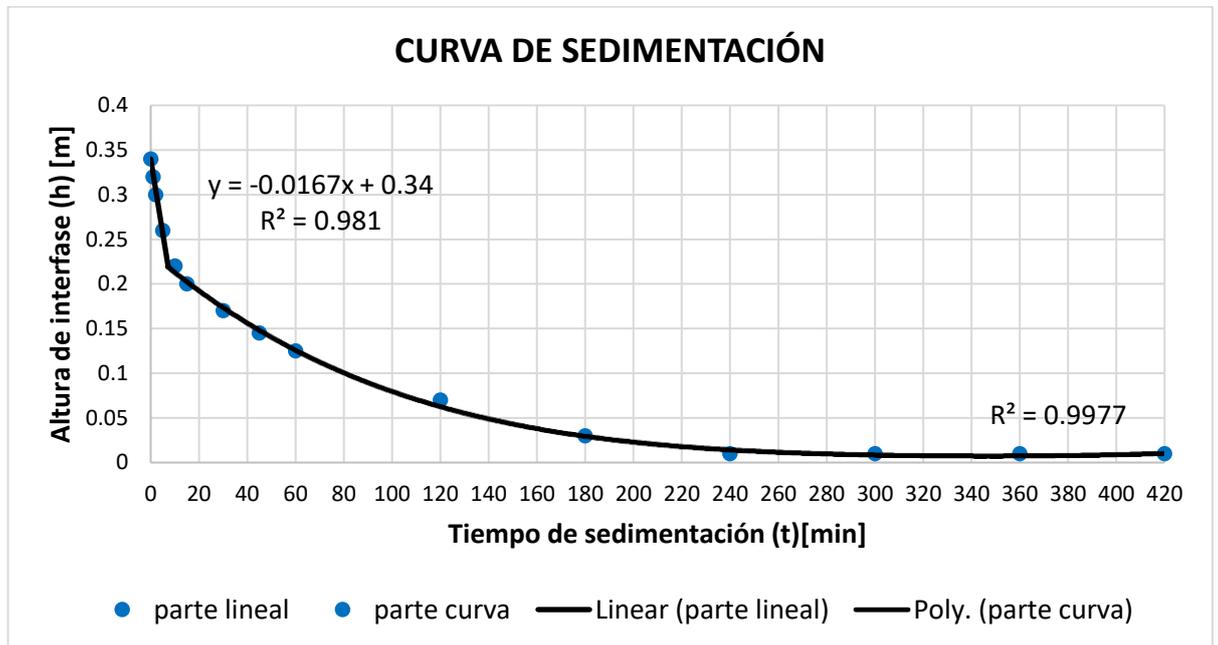


Figura 3.5 Curva de sedimentación para 2 g/l.

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0167 \frac{m}{mn}$$

$$V_s = 0,0002783 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 1,002 \frac{m}{h}$$

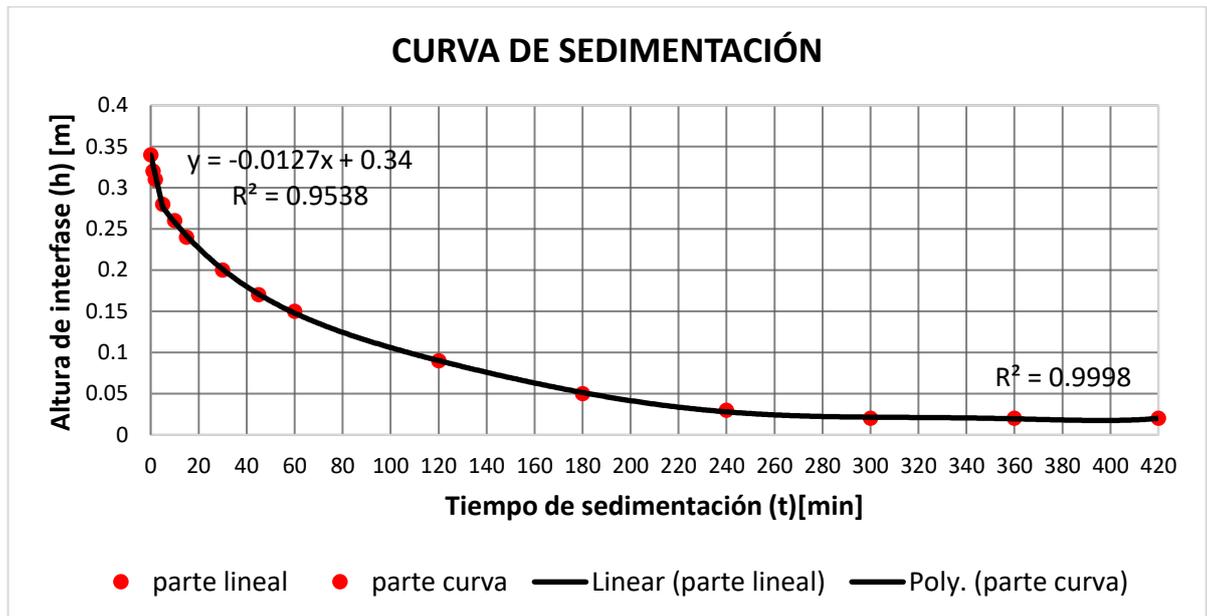
3.2.2 Curva de sedimentación para concentración de 5 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla II. Datos obtenidos para 5 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,32
2	0,31
5	0,28
10	0,26
15	0,24
30	0,20
45	0,17
60	0,15
120	0,09
180	0,05
240	0,03
300	0,02
360	0,02
420	0,02

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.



Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0127 \frac{m}{min}$$

$$V_s = 0,0002117 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 0,762 \frac{m}{h}$$

3.2.3 Curva de sedimentación para concentración de 10 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla III. Datos obtenidos para 10 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,33
2	0,325
5	0,305
10	0,285
15	0,27
30	0,235
45	0,21
60	0,19
120	0,12
180	0,07
240	0,04
300	0,03
360	0,03
420	0,03

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

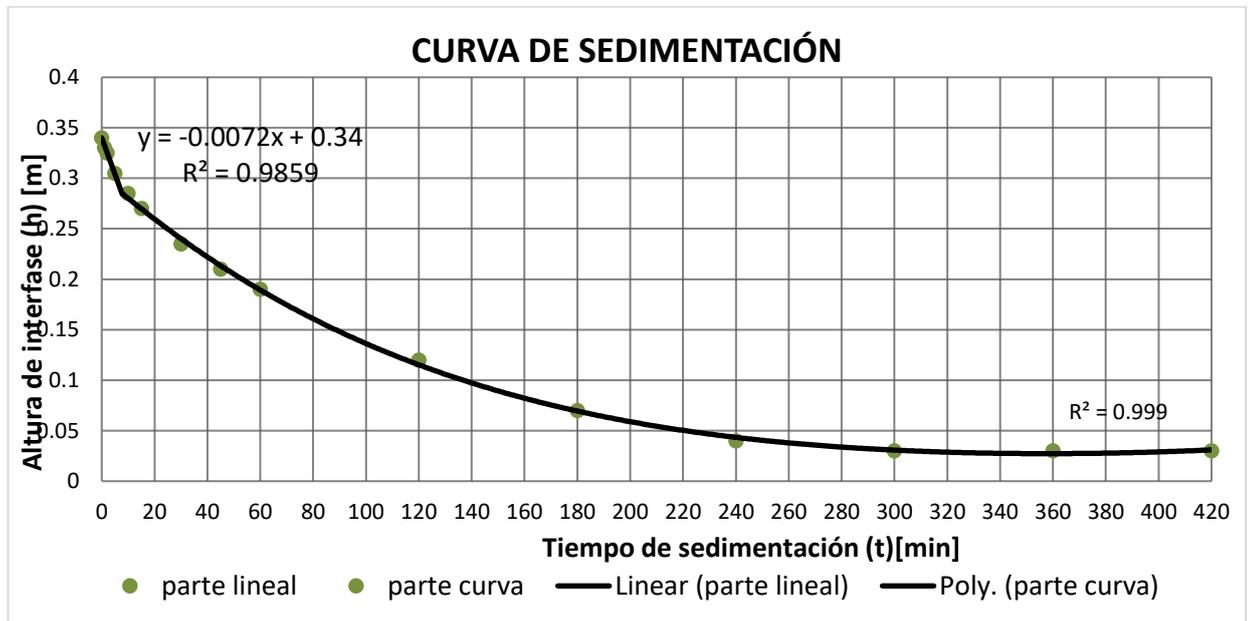


Figura 3.7 Curva de sedimentación para 10 g/l.

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0072 \frac{m}{min}$$

$$V_s = 0,00012 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 0,432 \frac{m}{h}$$

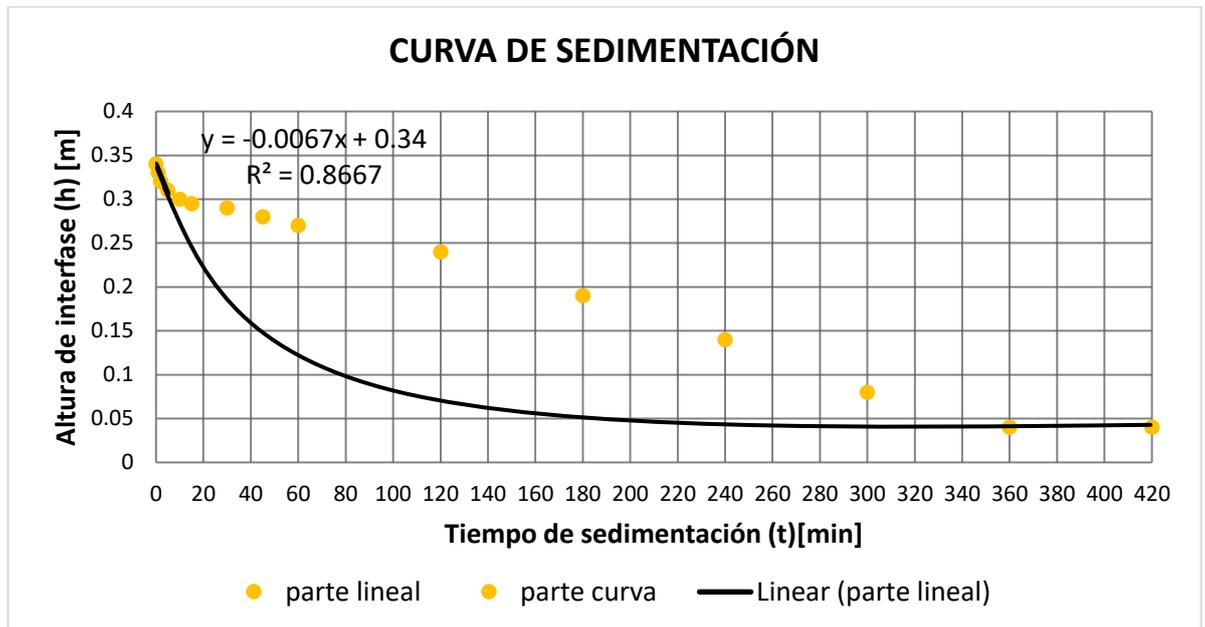
3.2.4 Curva de sedimentación para concentración de 12 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla IV. Concentración de 12 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,33
2	0,32
5	0,31
10	0,30
15	0,295
30	0,29
45	0,28
60	0,27
120	0,24
180	0,19
240	0,14
300	0,08
360	0,04
420	0,04

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.



Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0067 \frac{m}{min}$$

$$V_s = 0,0001117 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 0,402 \frac{m}{h}$$

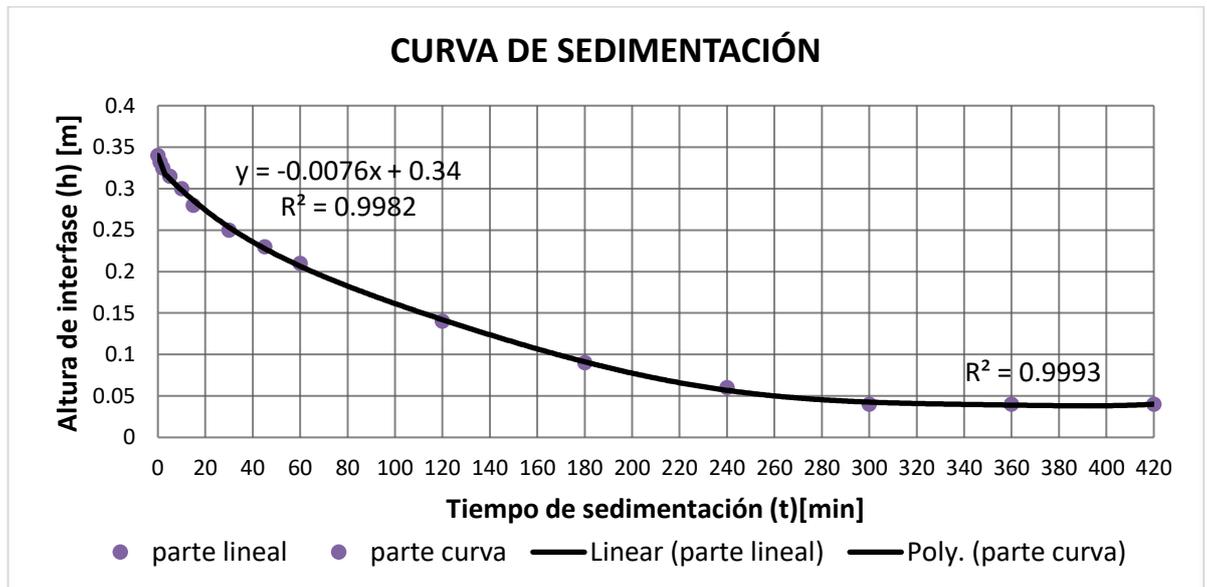
3.2.5 Curva de sedimentación para concentración de 15 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla V. Datos obtenidos para 15 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,332
2	0,325
5	0,315
10	0,30
15	0,28
30	0,25
45	0,23
60	0,21
120	0,14
180	0,09
240	0,06
300	0,04
360	0,04
420	0,04

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.



Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0076 \frac{m}{min}$$

$$V_s = 0,0001267 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 0,456 \frac{m}{h}$$

3.2.6 Curva de sedimentación para concentración de 20 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla VI. Datos obtenidos para 20 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,335
2	0,33
5	0,32
10	0,31
15	0,29
30	0,26
45	0,24
60	0,22
120	0,16
180	0,11
240	0,07
300	0,05
360	0,05
420	0,05

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

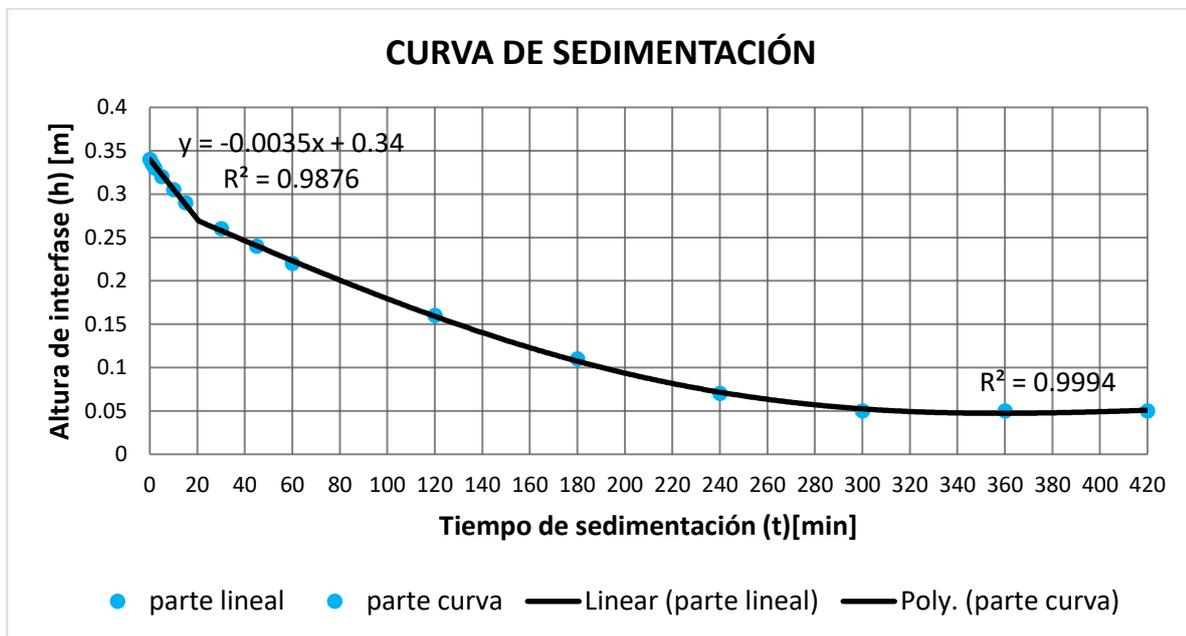


Figura 3.10 Curva de sedimentación para 20 g/l.

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0035 \frac{m}{min}$$

$$V_s = 0,0000583 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 0,210 \frac{m}{h}$$

3.2.7 Curva de sedimentación para concentración de 25 g/l

A continuación se presentan los datos obtenidos, la curva y la velocidad correspondiente.

Tabla VII. Datos obtenidos para 25 g/l.

TABLA DE DATOS	
t (min)	h (m)
0	0,34
1	0,335
2	0,33
5	0,325
10	0,315
15	0,312
30	0,31
45	0,305
60	0,3
120	0,28
180	0,24
240	0,19
300	0,13
360	0,08
420	0,08

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

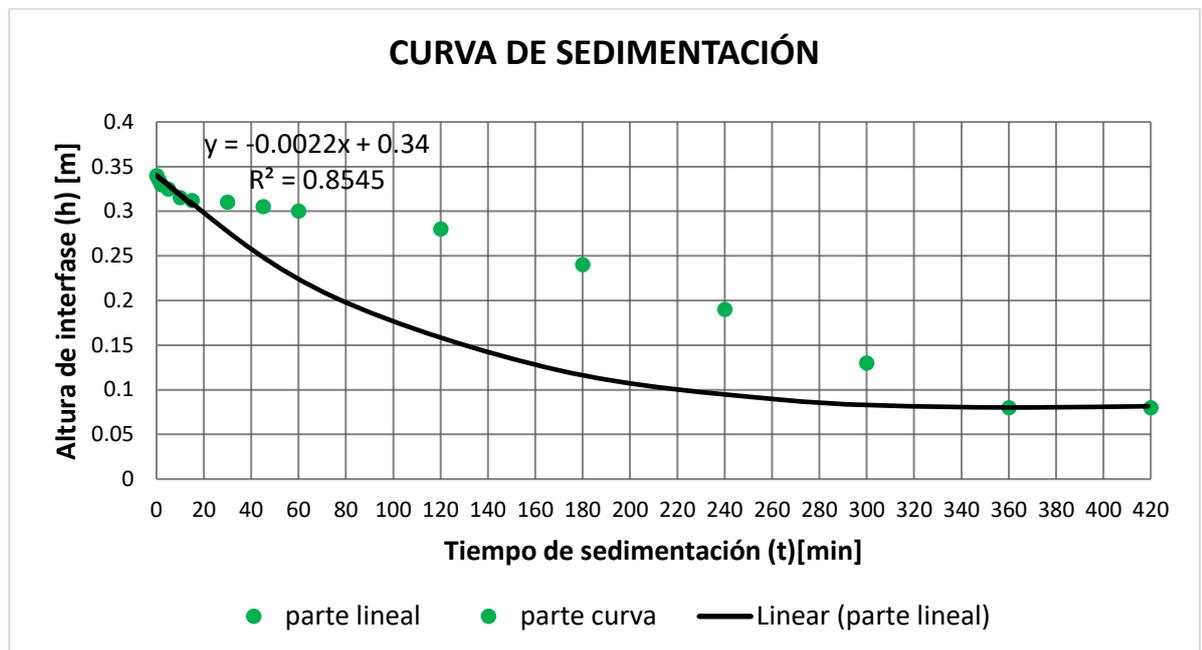


Figura 3.11 Curva de sedimentación para 25 g/l.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Se usa la opción de línea de tendencia lineal sólo en la parte recta de la curva. Usando la ecuación de la recta: $y = mx + b$, se halla la velocidad de sedimentación, puesto que la pendiente de dicha recta es igual a la velocidad de sedimentación, es decir $m = V_s$.

$$V_s = 0,0022 \frac{m}{min}$$

$$V_s = 0,0000333 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 0,120 \frac{m}{h}$$

3.3 Curva de flujo de sólidos por acción de la gravedad (SFg)

Con las velocidades obtenidas de cada curva de sedimentación en función de las respectivas concentraciones usadas, se obtuvo cada valor de la curva de flujo de sólidos con la siguiente expresión:

$$SFg = C * Vs \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

SFg: Flujo de sólidos por acción de la gravedad en $[\frac{kg}{m^2h}]$

C: Concentración de muestra en $[\frac{kg}{m^3}]$

Vs: Velocidad de sedimentación en $[\frac{m}{h}]$

A continuación se presenta una tabla con los valores obtenidos de SFg.

Tabla VIII. Valores de SFg

C [kg/m3]	Vs [m/h]	SFg [Kg/m2h]
0	0	0
2	1,002	2,0040
5	0,762	3,8100
10	0,432	4,3200
12	0,402	4,8240
15	0,456	6,8400
20	0,210	4,2000
25	0,120	3,0000

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Finalmente se tiene la curva de flujo de sólidos, donde el eje de las abscisas son las diferentes concentraciones y el eje de las ordenadas los correspondientes valores de flujo de sólidos.

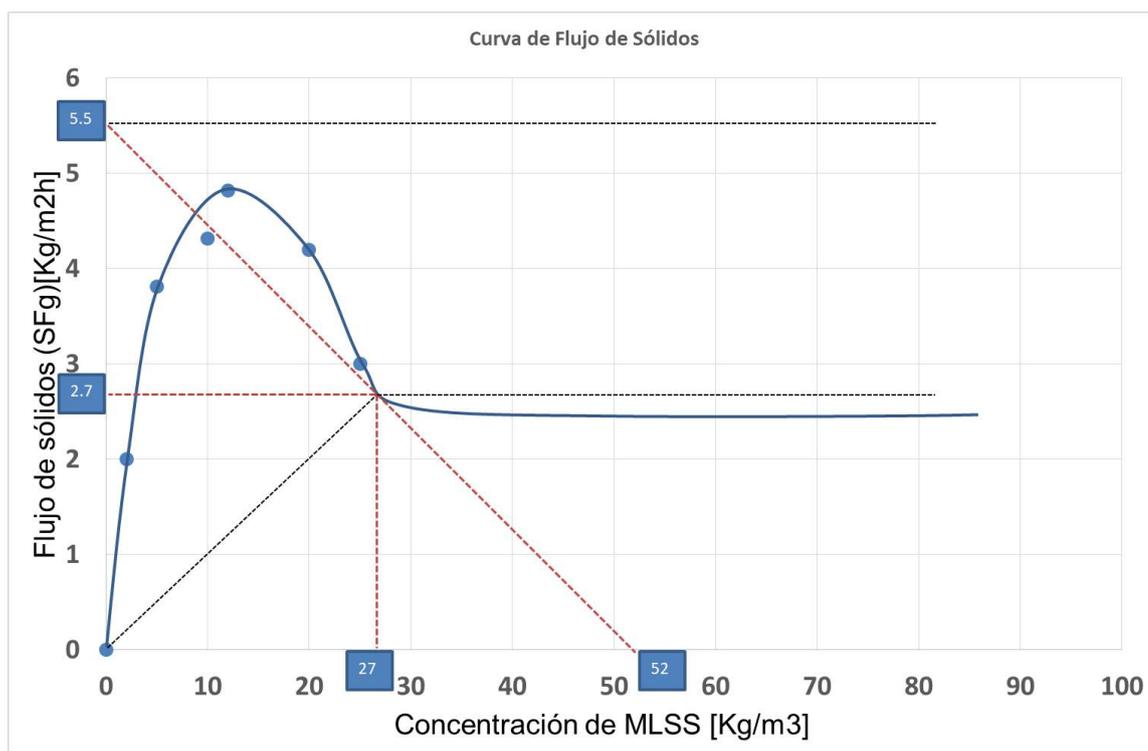


Figura 3.12 Curva de flujo de sólidos.
Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

3.4 Diseño de sedimentador rectangular

Para el dimensionamiento del sedimentador rectangular, se siguieron una serie de pasos para verificar si se cumplía con los criterios de diseño de la literatura empleada. A continuación se presentan los pasos empleados, para las diferentes concentraciones de muestra usadas.

3.4.1 Dimensionamiento con una concentración de 2 g/l

3.4.1.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0.0002783 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 24,05 \frac{m^3}{m^2 \cdot día}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s \quad \text{Ec. 4}$$

$$A_s = L_2 * B \quad \text{Ec. 5}$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0001169 \frac{m^3}{s}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m} \quad \text{Ec. 6}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m} \quad \text{Ec. 7}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3 \quad \text{Ec. 8}$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, $H = 0.21 \text{ m}$ y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m} \quad \text{Ec. 9}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100*Q}{B*H} = 0.13917 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 10}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q}$$

$$T_0 = \frac{A_s*H}{Q} = 754.49 \text{ seg} = 13 \text{ minutos} \quad \text{Ec. 11}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m} \quad \text{Ec. 12}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.29 \frac{\text{l}}{\text{s.m}} \quad \text{Ec. 13}$$

3.4.1.2 Diseño de pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{v_o} = 0.001169 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 14}$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96E - 05 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 15}$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 60 \quad \text{Ec. 16}$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m} \quad \text{Ec. 17}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 6$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 10$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.021 \text{ m} \quad \text{Ec. 18}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.1055 \text{ m} \quad \text{Ec. 19}$$

3.4.2 Dimensionamiento con una concentración de 5 g/l

3.4.2.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0.0002117 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_s = 18,29 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s$$

$$A_s = L_2 * B$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0000889 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, $H = 0.21 \text{ m}$ y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100 * Q}{B * H} = 0.10583 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q} = \frac{A_s * H}{Q} = 17 \text{ minutos}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.22 \frac{l}{s.m}$$

3.4.2.2 Diseño de pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = 0.000889 \text{ m}^2$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96E - 05 \text{ m}^2$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 45$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 5$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 9$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.0252 \text{ m}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.0992 \text{ m}$$

3.4.3 Dimensionamiento con una concentración de 10 g/l

3.4.3.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0.00012 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_s = 10,37 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s$$

$$A_s = L_2 * B$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0000504 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, $H = 0.21$ m y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100 * Q}{B * H} = 0.06 \frac{m}{s}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q} = \frac{A_S * H}{Q} = 29 \text{ minutos}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.13 \frac{l}{s.m}$$

3.4.3.2 Diseño de la pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = 0.000504 \text{ m}^2$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96344E - 05 \text{ m}^2$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 27$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 3$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 9$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.042 \text{ m}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.032 \text{ m}$$

3.4.4 Dimensionamiento con una concentración de 12 g/l

3.4.4.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0.0001117 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 9,65 \frac{m^3}{m^2 \cdot día}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s$$

$$A_s = L_2 * B$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0000469 \frac{m^3}{s}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, $H = 0.21 \text{ m}$ y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100 * Q}{B * H} = 0.0558 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q} = \frac{A_s * H}{Q} = 31 \text{ minutos}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.12 \frac{\text{l}}{\text{s.m}}$$

3.4.4.2 Diseño de la pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = 0.000469 \text{ m}^2$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96E - 05 \text{ m}^2$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 24$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 4$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 6$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.0315 \text{ m}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.1212 \text{ m}$$

3.4.5 Dimensionamiento con una concentración de 15 g/l

3.4.5.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0.0001267 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_s = 10.94 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s$$

$$A_s = L_2 * B$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0000532 \frac{m^3}{s}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, H = 0.21 m y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100 * Q}{B * H} = 0.063 \frac{m}{s}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q} = \frac{A_S * H}{Q} = 28 \text{ minutos}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.133 \frac{l}{s.m}$$

3.4.5.2 Diseño de la pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = 0.000532 \text{ m}^2$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96E - 05 \text{ m}^2$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 27$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 3$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 9$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.042 \text{ m}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.032 \text{ m}$$

3.4.6 Dimensionamiento con una concentración de 20 g/l

3.4.6.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0,0000583 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_s = 5,04 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s$$

$$A_s = L_2 * B$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0000245 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, $H = 0.21$ m y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100 * Q}{B * H} = 0.02917 \frac{m}{s}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q} = \frac{A_s * H}{Q} = 60 \text{ minutos}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.061 \frac{l}{s.m}$$

3.4.6.2 Diseño de la pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = 0.000245 \text{ m}^2$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96E - 05 \text{ m}^2$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 15$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 3$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 5$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.042 \text{ m}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.116 \text{ m}$$

3.4.7 Dimensionamiento con una concentración de 25 g/l

3.4.7.1 Dimensionamiento exterior del proyecto

1. Para el diseño, la velocidad de sedimentación será igual a la carga superficial o carga hidráulica.

$$V_s = 0,0000333 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 2,88 \frac{m^3}{m^2 \cdot día}$$

2. Se halló el caudal de diseño Q, con la siguiente expresión:

$$Q = A_s * V_s$$

$$A_s = L_2 * B$$

$$L_2 = 1.05 \text{ m}$$

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$A_s = 0.42 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.000014 \frac{m^3}{s}$$

3. Se asume un ancho del sedimentador y se determina la longitud de la zona de sedimentación.

$$B = 0.4 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{A_s}{B} = 1.05 \text{ m}$$

4. Se asume la distancia de separación entre la entrada del flujo y la pantalla difusora o cortina de distribución del flujo.

$$L_1 = 0.15 \text{ m}$$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 1.20 \text{ m}$$

Se verifica que cumpla la relación L/B que tiene como rango de 3 a 6.

En este caso como se aprecia a continuación si cumple esta relación.

$$\frac{L}{B} = \frac{1.20}{0.4} = 3$$

5. Se asume la profundidad de la unidad, $H = 0.21 \text{ m}$ y se verifica que cumpla con la relación L/H que tiene como rango de 5 a 20.

$$\frac{L_2}{H} = 5 \text{ m}$$

6. Se determina la velocidad horizontal V_h del flujo, con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{100 * Q}{B * H} = 0.0167 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

7. Se determina el periodo de retención.

$$T_0 = \frac{\text{Volumen del Sedimentador}}{Q} = \frac{A_s * H}{Q} = 105 \text{ minutos}$$

8. Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad, para facilitar el deslizamiento del sedimento, se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0.1H = 0.231 \text{ m}$$

9. Con un vertedero a la salida, de longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se tiene la carga hidráulica sobre el vertedero.

$$qv = \frac{Q}{B} = 0.035 \frac{\text{l}}{\text{s.m}}$$

3.4.7.2 Diseño de la pantalla difusora

1. Se asume una velocidad de paso entre los orificios. La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s, para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

$$V_o = 0.1 \frac{m}{s}$$

2. Se determina el área total de los orificios.

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = 0.000140 \text{ m}^2$$

3. Se adopta un diámetro de orificio.

$$d_o = 0.005 \text{ m}$$

4. Se determina el área de cada orificio.

$$a_o = \pi * \frac{d_o^2}{4} = 1.96E - 05 \text{ m}^2$$

5. Se determina el número de orificios.

$$n = \frac{A_o}{a_o} = 8$$

6. Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios.

$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.126 \text{ m}$$

7. Se asume un número de filas de orificios.

$$n_f = 2$$

Entonces se tiene el número de columnas,

$$n_c = 4$$

8. Se determina el espaciamiento entre filas.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0.063 \text{ m}$$

9. Se determina el espaciamiento entre columnas.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} = 0.1055 \text{ m}$$

3.5 Ensayo cono Imhoff (Sólidos sedimentables)

El conjunto de partículas que se sedimentan de un cuerpo de agua en un periodo de tiempo, se denominan sólidos sedimentables. Se suele medir unidades de volumen (ml/l).

La determinación se realiza dejando descansar la muestra en un cono Imhoff durante media hora. El índice de lodos (V30), es la determinación de volumen de lodos en una muestra de un litro sedimentado durante 30 minutos; los valores de V30 en el reactor no deben ser menores al 15% ni superiores al 50%.

La fórmula, como ya se la describió anteriormente, es la siguiente:

$$SVI = 1000 \frac{V_{\text{lodo}}}{MLSS * V}$$

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en el ensayo de sólidos sedimentables.

Tabla IX. Resultados de SVI

CONCENTRACIÓN (mg)	MLSS (mg/l)	V_{Lodo} (ml)	SVI (ml/g)
2000	21	4	190
5000	47	9	191
10000	110	21	191
15000	121	23	190
20000	215	41	191

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

El promedio del SVI es de 191 ml/g, luego de tener este SVI se revisa la figura 9 que describe que tipo de lodo se tiene según el SVI encontrado. En este caso se tiene un lodo considerado de buena calidad que se sedimenta más lentamente y así atrapa más materia orgánica.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de la velocidad de sedimentación

A continuación, se detallan las diferentes velocidades que se obtuvieron en el trabajo de oficina, después de los ensayos respectivos:

Tabla X. Comparación de velocidades de sedimentación con rangos de diseño.

CONCENTRACIONES g/l	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN $m^3/m^2 \cdot \text{día}$	RANGOS DE DISEÑO $m^3/m^2 \cdot \text{día}$	NO CUMPLE	SI CUMPLE
2	24.05	[2-10]		
5	18.29	[2-10]		
10	10.37	[2-10]		
12	9.65	[2-10]		
15	10.94	[2-10]		
20	5.04	[2-10]		
25	2.88	[2-10]		

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Se puede observar que únicamente las velocidades de sedimentación correspondientes a las concentraciones de 12, 20, y 25 g/l, cumplen con el rango de diseño el mismo que está comprendido entre 2 y 10.

4.2 Análisis del tiempo de retención

A continuación se presentan los valores correspondientes al tiempo de retención hidráulica, es decir el tiempo que permanece una unidad de fluido en el tanque de sedimentación. Esto se aplica al momento de realizar la práctica a flujo continuo.

Tabla XI. Comparación del tiempo de retención con rangos de diseño.

CONCENTRACIONES g/l	TIEMPO DE RETENCIÓN horas	RANGOS DE DISEÑO horas	NO CUMPLE	SI CUMPLE
2	0.21	[1-3]		
5	0.28	[1-3]		
10	0.49	[1-3]		
12	0.52	[1-3]		
15	0.46	[1-3]		
20	1.00	[1-3]		
25	1.75	[1-3]		

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

Las concentraciones de muestra que cumplen con los rangos de diseño, son las correspondientes a las de 20 y 25 g/l, las mismas que tienen un tiempo de retención igual a 1 y 1.75 horas respectivamente.

4.3 Análisis de la carga hidráulica sobre el vertedero de salida

Finalmente se muestran los valores correspondientes a la altura del flujo o carga hidráulica sobre el vertedero de salida.

Tabla XII. Comparación de carga hidráulica sobre vertedero de salida con rango de diseño.

CONCENTRACIONES g/l	C. HIDRA. SOBRE VER. DE SALIDA l/s.m	RANGO DE DISEÑO l/s.m	NO CUMPLE	SI CUMPLE
2	0.29	[≤3]		
5	0.22	[≤3]		
10	0.13	[≤3]		
12	0.12	[≤3]		
15	0.133	[≤3]		
20	0.061	[≤3]		
25	0.035	[≤3]		

Fuente: Guillín, G., Ortega, J., 2017.

En este caso se puede observar, que todas las concentraciones de muestra usadas en el ensayo de laboratorio cumplen con el rango de diseño, teniendo como menor carga hidráulica 0.035 l/s.m correspondiente a la concentración de 25 g/l y como mayor valor 0.29 l/s.m correspondiente a la concentración de 2 g/l.

Haciendo un análisis comparativo final, se tiene que las concentraciones correspondientes a 20 y 25 g/l cumplen efectivamente con los tres parámetros de diseño expuestos.

Por otro lado, de la figura 3.12 se puede mencionar que el punto máximo que alcanza la curva es a la concentración de 12 kg/m³, donde el flujo de sólido es igual a 4.824 kg/m²h. Así también se puede observar que no se consideró el punto correspondiente a la concentración de 10 kg/m³, por ser un dato aberrante. De igual manera no se consideró el punto de la concentración de 15 kg/m³, debido a que la velocidad de sedimentación calculada es mayor que la velocidad de la concentración de 12 kg/m³, esto no es lógico.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En el ensayo de sedimentación se pudo observar que, a medida que se usaba mayor concentración de muestra, la velocidad de sedimentación disminuía.

Se eliminaron datos aberrantes que no permitían tener una curva parecida a la literatura empleada. Por ejemplo en las figuras 3.8 y 3.11 se pudo observar que existen datos por encima de la curva de sedimentación, estos datos son considerados aberrantes, es decir no estaban dentro del comportamiento lógico.

Debido a que se tuvo una restricción con el área de ubicación del sedimentador. Este se diseñó de manera inversa, es decir, una vez calculada la velocidad de sedimentación, por medio de los ensayos de laboratorio, y teniendo el área específica se obtuvo el caudal con el cual el sedimentador operará de manera óptima.

Para el diseño del sedimentador se eligió la concentración de 20 g/l de la muestra número 4, lodo seco pulverizado del Río Los Tintos, debido a que cumplía con todos los parámetros de diseño.

Dentro del dimensionamiento del tanque de sedimentación, se utilizó una pantalla difusora perforada, tanto a la entrada como a la salida, con la finalidad de evitar perturbaciones en el proceso de asentamiento de las partículas.

El resultado del SVI describe a un lodo denso, es decir, es lentamente sedimentable y así atrapa más materia orgánica. Este lodo se lo considera de buena calidad.

Finalmente se pudo construir el sedimentador rectangular a escala, considerando todos los criterios de diseño. Así mismo se realizó un manual de operación, para que los estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, realicen sus prácticas de laboratorio.

RECOMENDACIONES

Trabajar con lodo húmedo de preferencia para evitar la pérdida de su composición al momento de secarlo. Teniendo en cuenta que al momento de realizar el ensayo, se debe usar un mecanismo mecánico para homogenizar toda la muestra en el agua, de manera que no queden residuos granulares que puedan alterar el ensayo.

Preparar la muestra de suelo con dos días de anticipación, para lograr cumplir con todos los objetivos de la práctica de laboratorio.

Para que el sedimentador opere de manera óptima se debe respetar las consideraciones mencionadas en el proyecto. Sin embargo el prototipo también puede funcionar por medio de un proceso a flujo continuo, esto para futuros proyectos.

Realizar la debida limpieza del sedimentador después de cada práctica, el no hacerlo hará que el vidrio pierda su propiedad de transparencia, y esto afectaría en la lectura de las alturas de interfase.

Al momento de determinar la velocidad, mediante la pendiente de la curva, ubicar la tangente desde $t = 0$.

ANEXOS

ANEXO A

RECOPIACIÓN DE MUESTRAS PARA LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LABORATORIO

Figura A-1. Lagunas de Oxidación de la Espol.



Figura A-2. Camino a la Planta de Tratamiento.



Figura A-3. Recolección de la primera muestra.



Figura A-4. Primera muestra lista para el ensayo.



Figura A-5. Recolección de la segunda muestra, Malecón 2000, Guayaquil.



Figura A-6. Toma de muestra 2.



Figura A-7. Muestra 2 obtenida del Río Daule.



Figura A-8. Recolección de muestra obtenida del Río Los Tintos.



Figura A-9. Última muestra que sirvió para el diseño definitivo.



ANEXO B

ENSAYOS DE LABORATORIO CON TODAS LAS MUESTRAS RECOLECTADAS EN LOS DIFERENTES SITIOS MENCIONADOS

Figura B-1. Probeta para ensayo de sedimentación.

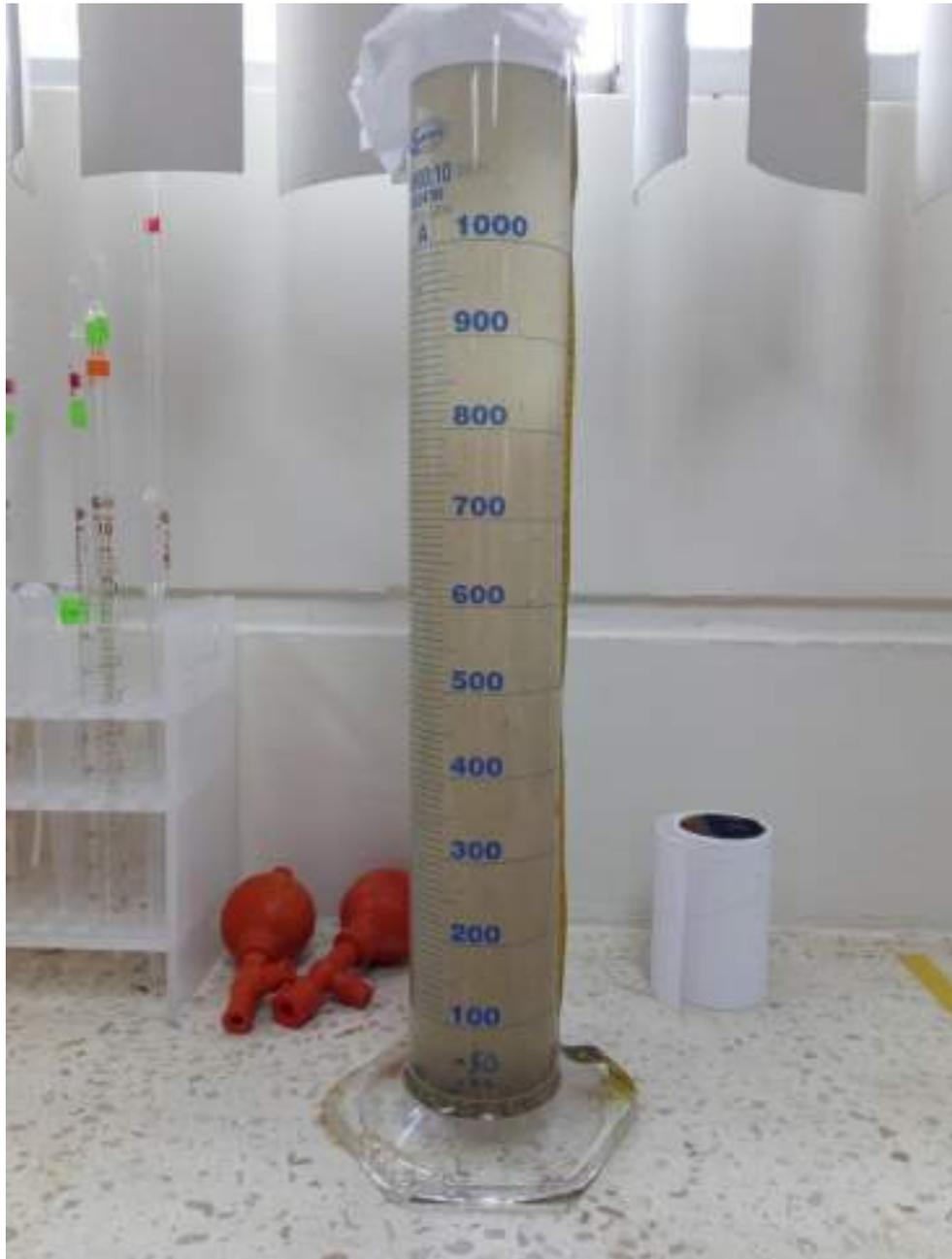


Figura B-2. Horno para eliminar la humedad de las muestras.



Figura B-3. Equipo para ensayo de test de jarras.

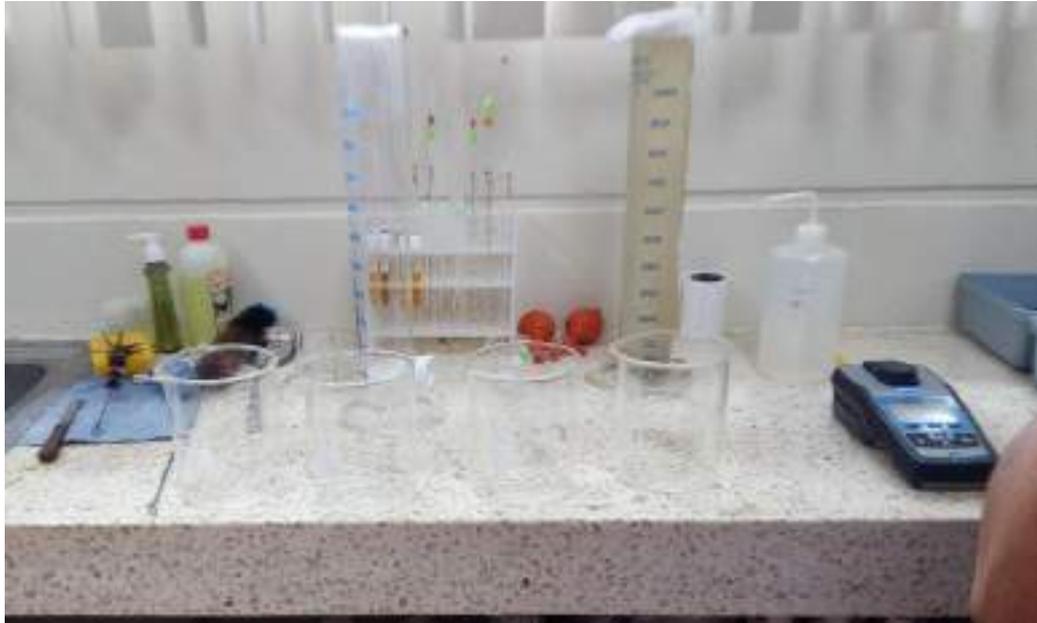


Figura B-4. Equipo para medir la turbiedad.



Figura B-5. Colocación de primera muestra para el test de jarras.



Figura B-6. Preparación para el ensayo.



Figura B-7. Test de Jarras.

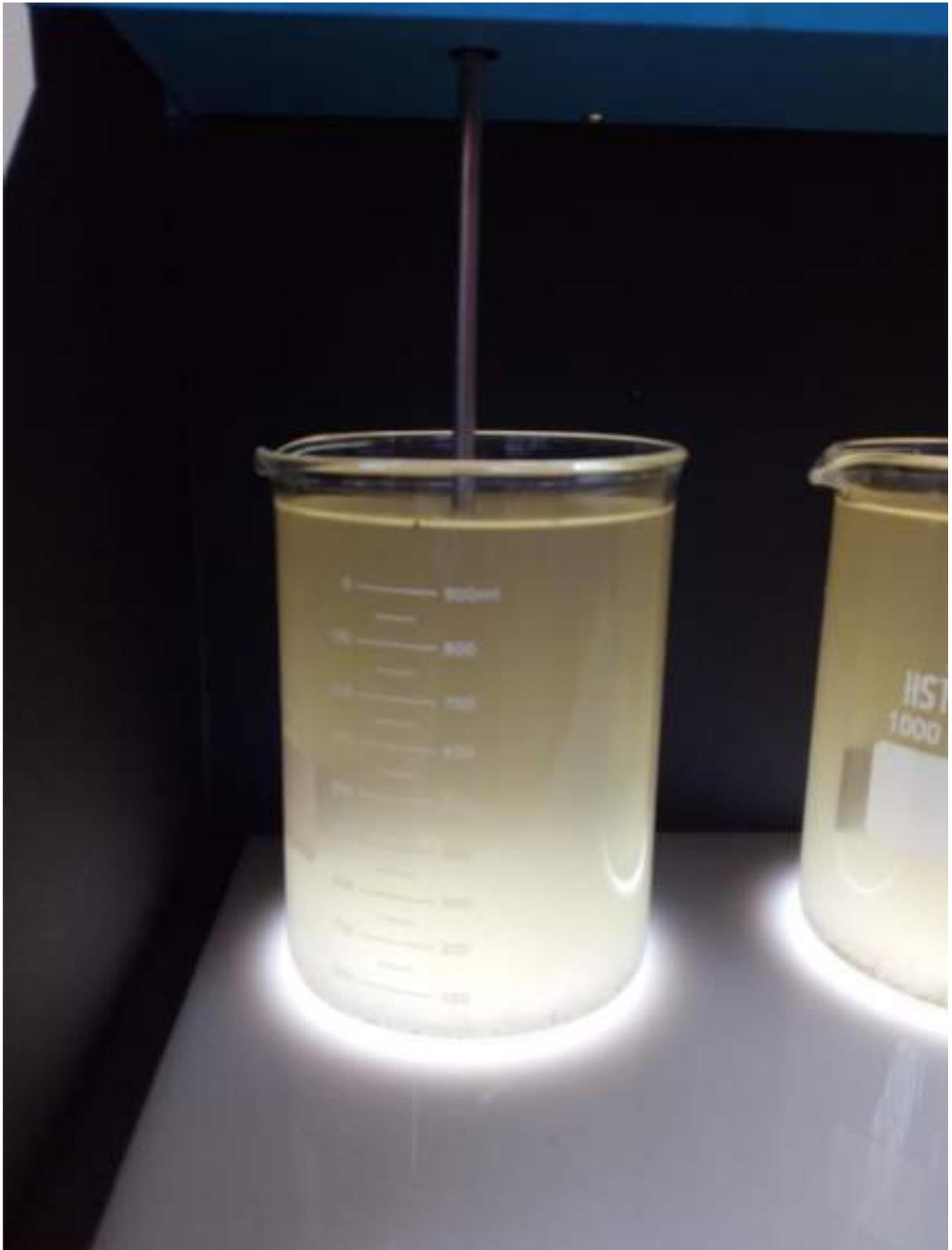


Figura B-8. Preparación del floculante para la primera muestra



Figura B-9. Colocación del floculante para la primera muestra.



Figura B-10. Vertido del floculante.

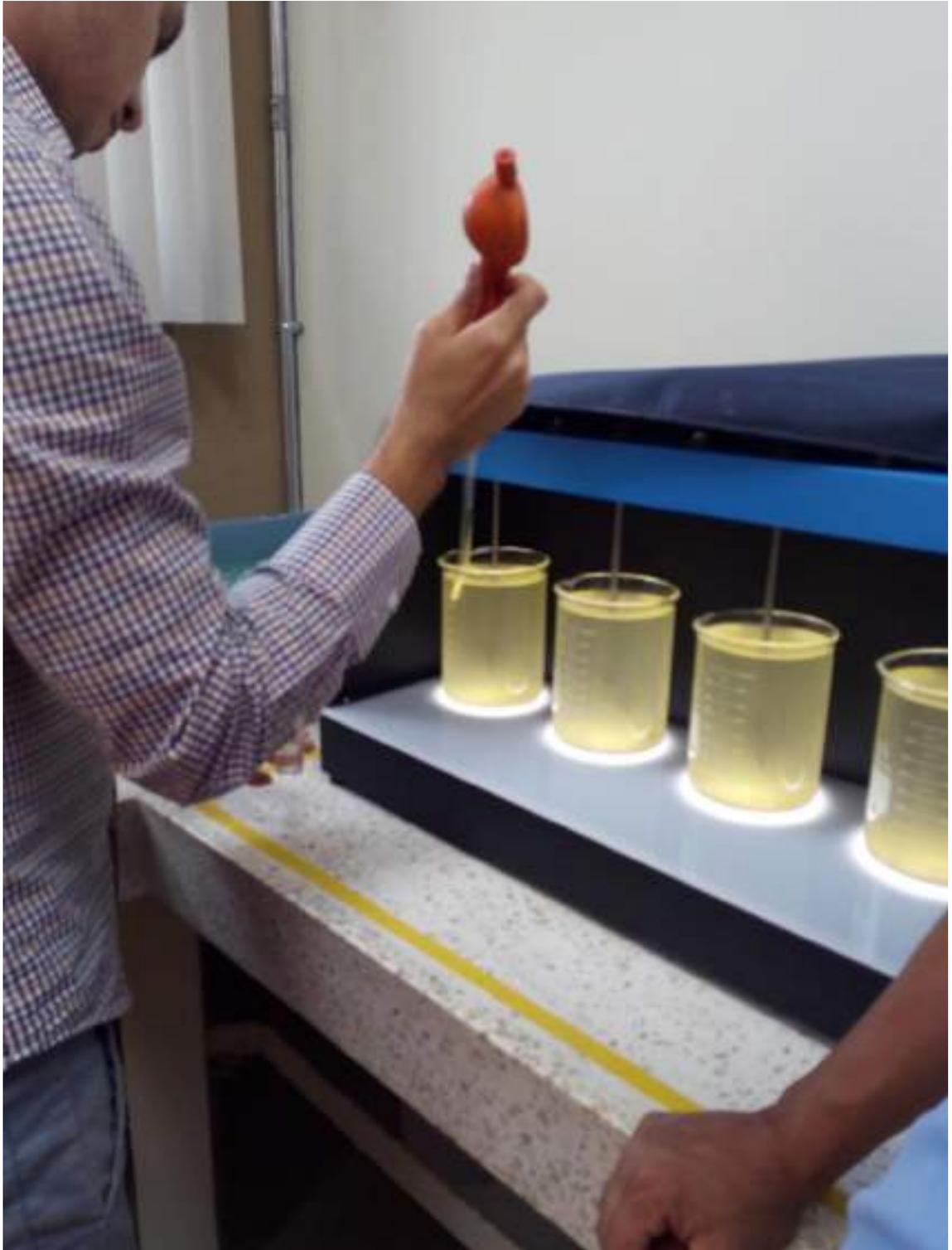


Figura B-11. Muestra descartada por cantidades grandes de SS.

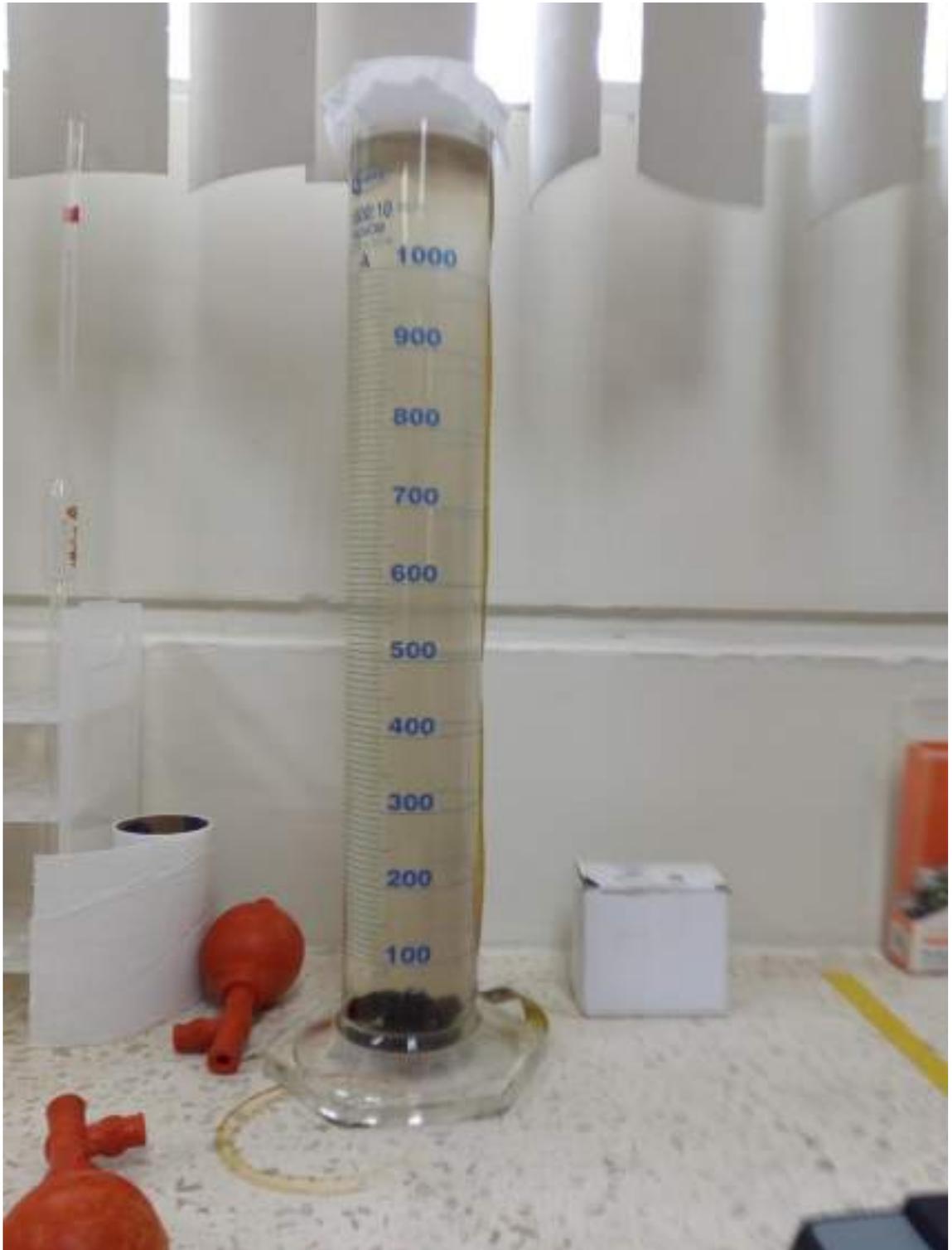


Figura B-12. Preparación de muestra 3.



Figura B-13. Lodo húmedo, muestra 4 del Rio Los Tintos.



Figura B-14. Lodo seco listo para pulverizarlo.



Figura B-15. Mortero utilizado para pulverizar el lodo seco.



Figura B-16. Ensayo de columnas de sedimentación con diferentes concentraciones de la muestra 4.

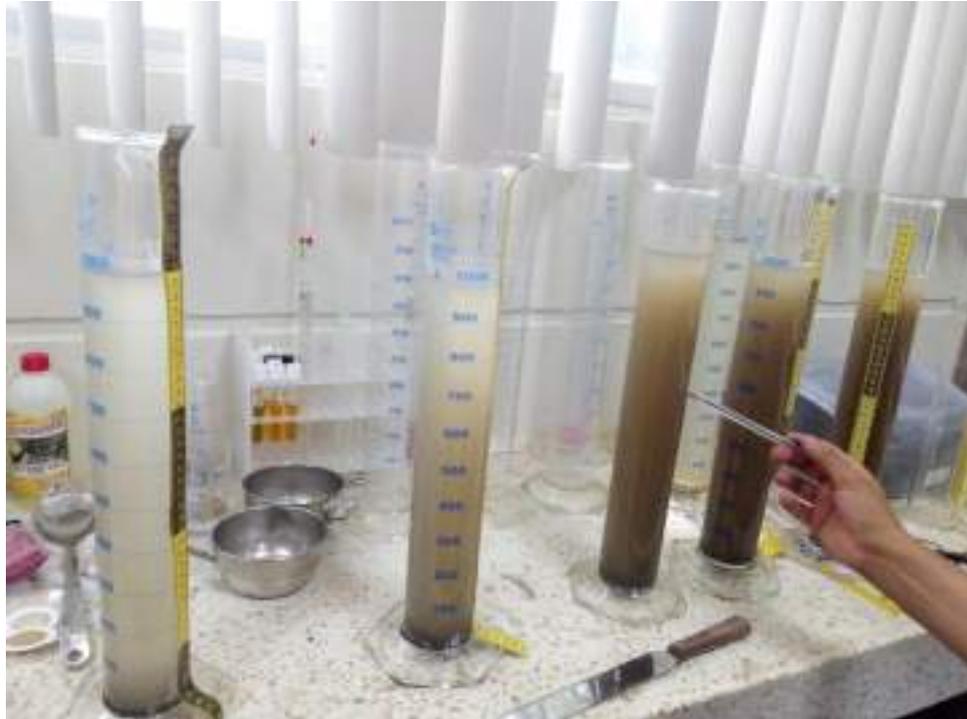


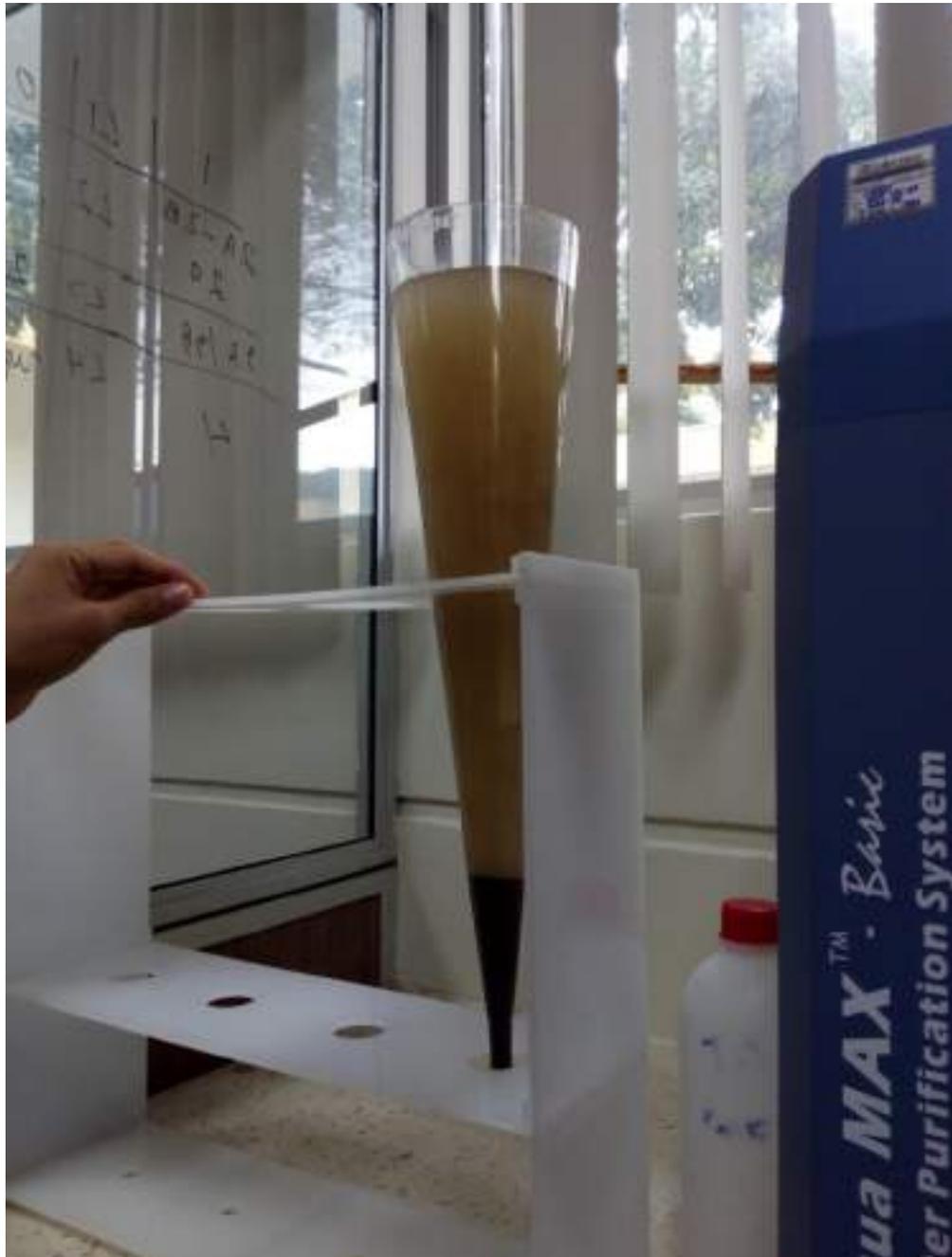
Figura B-17. Concentraciones elevadas de lodo.



Figura B-18. Cono Imhoff.



Figura B-19. Ensayo a los 30 minutos.



ANEXOS C

PLANOS

Figura C-1. Vista en planta.



Figura C-2. Corte longitudinal.



Figura C-3. Pantalla difusora con orificios.

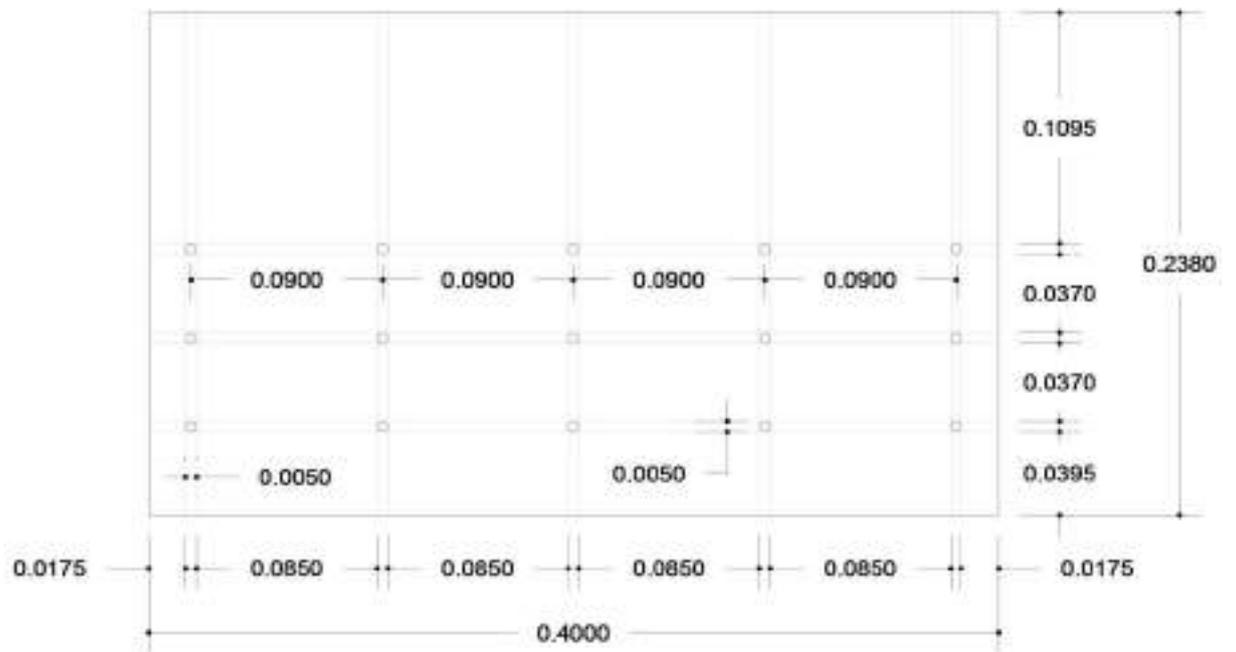
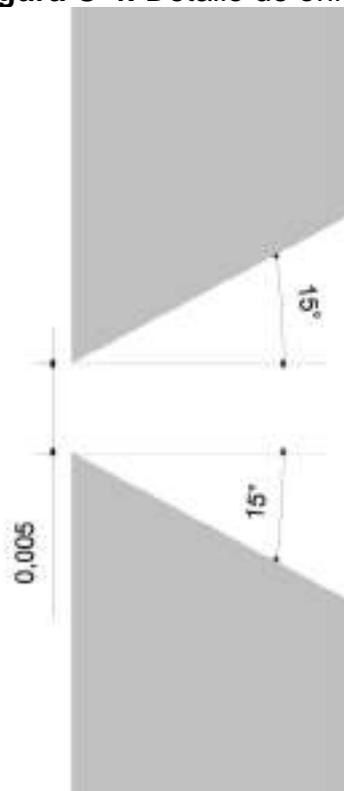


Figura C-4. Detalle de orificio.



ANEXO D

**PROCESO CONSTRUCTIVO DEL PROTOTIPO DE TANQUE DE
SEDIMENTACIÓN**

Figura D-1. Unión de paredes de vidrio crudo.



Figura D-2. Pegado final de las paredes del tanque.



Figura D-3. Colocación de silicona para evitar filtraciones.



Figura D-4. Construcción de los vertederos de la entrada y salida.



Figura D-5. Perforación de las pantallas difusoras.



Figura D-6. Pantalla difusora con agujeros requeridos por el diseño.



Figura D-7. Producto esperado del proyecto.



ANEXO E
GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

		CÓDIGO
MATERIA		
PROFESOR		
ESTUDIANTE		
FECHA		
NOMBRE DE LA PRÁCTICA		

OBJETIVOS:

- Enseñar de manera didáctica el proceso de sedimentación de las partículas de una muestra de suelo.
- Simular un proceso de sedimentación en el prototipo a escala.
- Tomar alturas de clarificación.
- Realizar curvas de sedimentación.
- Determinar el índice de volumen de lodos.
- Verificar que tipo de lodo se tiene en el tanque de sedimentación.

EQUIPOS Y MATERIALES:

- Guantes de goma.
- Muestra de suelo pasante del tamiz 100.
- Pesa electrónica.
- Horno.
- Tanque prototipo de sedimentación.
- Rastrillo de goma (agitador).
- Apuntes de clases de la materia.
- Mandil.
- Esponja.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Parte A: Preparación de muestra.

- 1) Conseguir muestra de suelo suficiente y pasarlo por el tamiz # 100 hasta lograr 10 kg de muestra aproximadamente, considerando los finos.

Nota: El peso de la muestra a utilizar varía en función del porcentaje de finos que esta tenga.



2) Lavar la muestra de suelo de manera que se logre eliminar los finos.

Para realizar el lavado, colocar de apoco la muestra de suelo en el tamiz # 200 e ir lavando suavemente hasta que se observe que el color del agua, a la salida, sea relativamente clara.

Nota: Se recomienda hacer este procedimiento con anticipación, ya que puede tardar varias horas.



3) Ubicar la muestra retenida, en el tamiz # 200, en un recipiente.



- 4) Poner el recipiente, con la muestra retenida, en el horno a 100°C para que se evapore toda el agua contenida, durante 24 horas.



- 5) Sacar la muestra final del horno con la debida precaución, tener en cuenta que el recipiente está sumamente caliente. Procurar obtener un peso de muestra seca aproximadamente (o igual) a 2 kg.



Parte B: Procedimiento de ensayo.

- 1) Verificar que el tanque de sedimentación esté limpio y sin ningún residuo de cualquier materia.
- 2) Pasar la esponja para eliminar cualquier tipo de basura, sedimento de ensayos pasados o polvo.

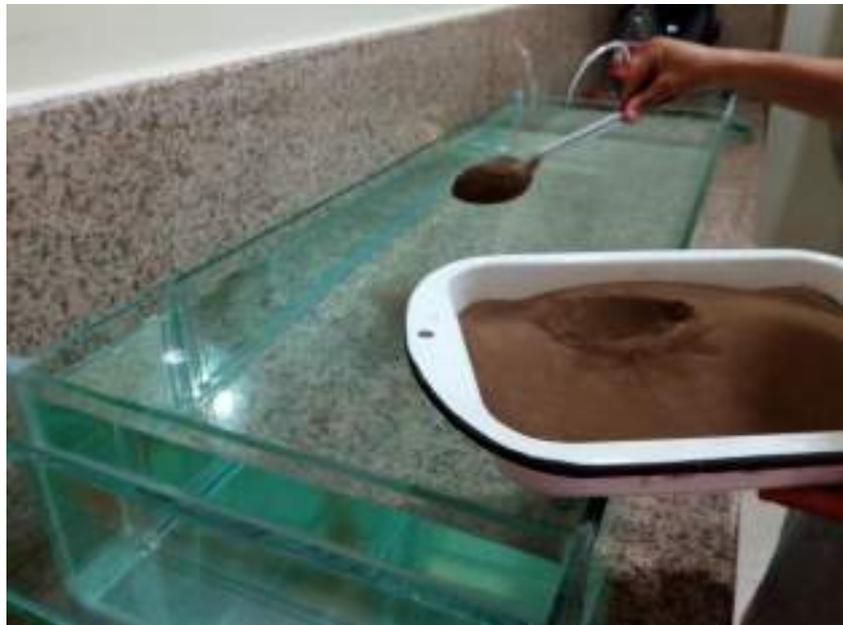


- 3) Llenar el tanque hasta la altura determinada por el docente de la cátedra (altura máxima de ensayo igual a 21 cm desde el fondo del tanque), cabe mencionar que el prototipo resiste hasta 100 litros para cumplir con su operación.

Nota: La cantidad de agua depende de la concentración que se espera colocar.



- 4) Verter de forma uniforme, por todo el tanque, 20 g/l de muestra final de suelo. Con la finalidad de tener una mezcla homogénea, se necesitan dos estudiantes como mínimo, para que uno vierta el suelo y el otro mezcle.





- 5) Cuando el agua en el recipiente esté totalmente mezclada con el suelo y sin perturbaciones se procede a tomar la medida de altura justo en la clarificación en intervalos de tiempo dispuesto por el docente de la materia.



- 6) Tomar la altura de lodo a los 30 minutos para poder determinar en oficina el índice de volumen de lodos.



- 7) Una vez realizada la práctica de laboratorio, evacuar el agua y purgar el material sedimentado.





Parte C: Trabajo de oficina.

- 1) Recopilación de datos tomados en el tiempo total que duró el proceso de sedimentación en el laboratorio de ingeniería sanitaria.
- 2) Graficar la curva de sedimentación de tal manera que el eje de las abscisas represente el tiempo de sedimentación (t) en minutos y el eje de las ordenadas la altura de interfase (h) en metros.
- 3) Calcular la pendiente de la curva de sedimentación que representa la velocidad de sedimentación.
- 4) Aplicar la fórmula de SVI para determinar con qué tipo de lodo se ha trabajado y clasificarlo según la siguiente tabla:

SVI	DESCRIPCIÓN
≤ 80	Lodo denso rápidamente sedimentable. Lodo típico de reactores de aireación extendido (sobre - oxidados).
100 - 200	Lodo considerado de buena calidad que sedimenta más lentamente y así atrapa más materia orgánica.
≥ 200	Lodo que sedimenta muy lentamente y que no es muy denso. El alto valor de SVI podría indicar lodo filamentoso y abultado (bulking).

CÁLCULOS

Parte A: Preparación de muestra.

Antes de poner la muestra final en el recipiente, éste debe ser pesado para tener el peso de recipiente y poder sacar el valor que interesa.

Para esta parte se utilizan fórmulas elementales, específicamente las operaciones de suma y resta. Por ejemplo, en el momento de obtener la muestra definitiva se debe hacer una que otra operación matemática.

Una vez obtenida la muestra retenida en el tamiz # 200, se la pesa en la balanza electrónica, este valor sería el peso húmedo. Cuando se saque la muestra del horno también se la debe pesar, esto se convertiría en el peso seco. Entonces se tendría:

$$W_{muestra\ húmeda} = W_{recipiente+muestra\ húmeda} - W_{recipiente}$$

$$W_{muestra\ seca} = W_{recipiente+muestra\ seca} - W_{recipiente} = Muestra\ Final$$

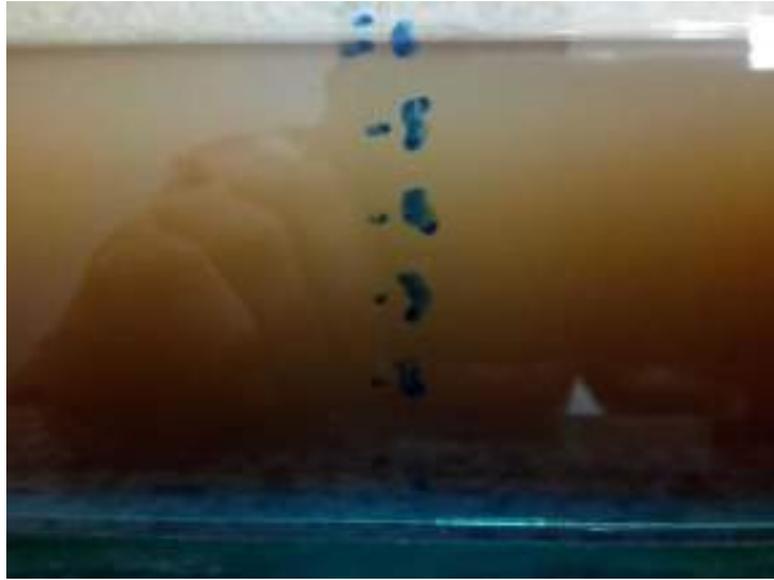
La idea principal en esta parte es conseguir por lo menos 20 gramos de muestra final por cada litro que se quiera colocar en el tanque de sedimentación.



Parte B: Procedimiento de ensayo.

En esta parte no se emplean fórmulas, el ensayo consiste en tomar el valor de la altura cada 5 minutos, 10 minutos o como lo disponga el docente. Las alturas se terminan de tomar después de que en tres o cuatro datos tengan los mismos valores.

Cuando los datos se repiten significa que la sedimentación está sumamente lenta; si se quiere seguir tomando datos se recomienda aumentar el rango de tiempo para una mejor perspectiva.



Tener en cuenta que el recipiente trabaja con 100 litros de volumen, esto significa que, si se trabaja con una concentración de 20 g/l, se requerirán como mínimo 2 kg de muestra final.

Parte C: Trabajo de oficina.

En esta última parte se debe graficar h vs t , donde h es la altura de interfase y t es el tiempo de sedimentación tomado para esa altura.

Finalmente, para determinar el índice de volumen de lodos se aplica la fórmula dada, cabe recalcar que este ensayo se lo hace con el cono imhoff pero que según la literatura empleada se puede aprovechar el tanque y tomar la medida a los 30 minutos con la consideración de que el volumen es mucho más grande que la del cono.

$$SVI = 1000 * \frac{V_{LODO}}{MLSS * V}$$

Dónde:

SVI: Índice de volumen de lodos [ml/g].

V_{LODO}: Volumen del lodo [ml].

MLSS: Concentración de licor mezclado [mg/l].

V: Volumen total de agua preparada [l].

ANÁLISIS Y RESULTADOS

- Determinar las alturas de interfase con sus respectivos tiempos de sedimentación.
- Graficar la curva de sedimentación lo más exacto posible, si es necesario ayudarse con las líneas de tendencia de Excel.
- Obtener la velocidad de sedimentación mediante la pendiente de la curva.
- Observar la descripción del lodo mediante el índice de volumen de lodos calculado previamente.

REFERENCIAS

- Proyecto de Grado “Diseño y Construcción a Escala Piloto de un Prototipo de Sedimentador Rectangular”. Guillín, G., Ortega J., 2017.

BIBLIOGRAFÍA

Arboleda, J. "Teoría y práctica de la purificación del agua". Tercera Edición. Vol.1. 2000.

Arboleda, J. "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". Lima, CEPIS/OPS, Serie Técnica 13, 1973.

AWWA, ASCE y CSSE. Water treatment plant design. AWWA, 1971.

Camp, T. Sedimentation and the design of the settling tanks. Journal ASCE, Paper 2285, pp. 895-959.

CEPIS-"Programa de protección de la Salud Ambiental-HPE Evaluación de plantas de tratamiento de agua". Tomo I, Manual DTIAPA C-5, 1081.

CEPIS; "Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores". OPS/CEPIS/05.158. UNATSABAR. Lima, 2005.

Companhia de Tecnologia de Saneamiento Ambiental-CETESB. Técnica de abastecimiento y tratamiento de agua. Volumen 2. Tratamiento de agua. Sao Paulo, CETESB, 1977.

Di Bernardo, Luiz. Sedimentación convencional y laminar. Copias para el curso de Maestría de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI. Lima 1988.

Maldonado Yactayo Víctor, Manual de Sedimentación Capítulo 7.

Matamoros David, "Apuntes del Curso Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Residuales" (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, 2017).

Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización, Volumen 1 y 2. Quinta Edición, McGraw Hill, Segunda Edición Revisada, 1995. ISBN 84-481-1727-1. ISBN 84-481-1606-2.

Pérez, J. Evaluation of lower cost methods of water treatment in Latin America. Lima, CEPIS/OPS, 1977, pp. 290.

"Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua". Manual III Teoría, Tomo 11, Sedimentación. Serie Filtración Rápida, 1992.

Tchobanoglous G. y Burton F., 1995. "Operaciones Físicas Unitarias". En: Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales; tratamiento, vertido y reutilización. España: McGraw-Hill. Volumen 1, tercera Edición, ISBN 84-481-1727-1