



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UNA PTAR A
ESCALA DE LABORATORIO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS -
ESPOCH, 2015”

Trabajo de titulación presentado para optar por el título de:
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORES: JEAN PIERRE PÉREZ JINEZ

EDISON DAMIAN ZUMBANA LÓPEZ

TUTOR: DR. GERARDO LEÓN CHIMBOLEMA

Riobamba - Ecuador

2016

©2016, Jean Pierre Pérez Jinez, Edison Damian Zumbana López

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UNA PTAR A ESCALA DE LABORATORIO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH, 2015”**, de responsabilidad de los señores Egresados: Jean Pierre Pérez Jinez y Edison Damian Zumbana López, ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Dr. Gerardo León

.....

.....

DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

Ing. Mónica Murillo

.....

.....

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Jean Pierre Pérez Jinez y Edison Damian Zumbana López, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 15 de marzo del 2016

Jean Pierre Pérez Jinez
C.I. 150082615-9

Edison Damian Zumbana López
C.I. 180463039-8

Nosotros, Jean Pierre Pérez Jinez y Edison Damian Zumbana López somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo experimental y el patrimonio intelectual del trabajo de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

JEAN PIERRE PÉREZ JINEZ

C.I. 150082615-9

EDISON DAMIAN ZUMBANA LÓPEZ

C.I. 180463039-8

DEDICATORIA

A Dios porque gracias a él todo fue posible.

A mis padres por su apoyo y amor infinito que fueron necesarios para poder seguir adelante y alcanzar todas mis metas y sueños planteados.

A mis abuelitos Luis y Elvia por recordarme siempre que el amor más puro y sincero es el de la familia y estén donde estén siempre les recordaré con ternura y amor.

A mis tíos y primos por siempre brindarme su cariño, consejos y apoyo incondicional.

Jean Pierre

A Dios por bendecirme con sabiduría, inteligencia y una maravillosa familia.

A mi papi, a mi mami y a mis hermanos por su amor incondicional que infundieron en mí la fortaleza que me permitió alcanzar este merecimiento.

A mis abuelitos por impulsar en mí el valor para perseverar a cada momento en esta etapa de mi vida.

Damian

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme permitido crecer y estar rodeado de una familia extraordinaria, gracias por la salud, la paciencia, el coraje y el conocimiento, que fueron indispensables para poder alcanzar este sueño.

A mis padres, abuelitos y toda mi familia por su amor, apoyo y dedicación desinteresada, gracias por haber hecho de mí una persona llena de principios, valores y defectos.

A mis amigos y compañeros por ser cómplices de todas las locuras y travesuras que hicimos a lo largo de toda la carrera.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo mi querida universidad que me llenó de conocimientos y me formó como un profesional de calidad y, a todos mis profesores, quiénes de alguna u otra manera permitieron realizar esta investigación.

A Mishel por hacer que mi vida universitaria lejos de casa fuera más interesante y divertida y, a Damián amigo y futuro colega por haber confiado en mí como compañero y por sus conocimientos que fortalecieron esta investigación.

Jean Pierre

A Dios porque sus bendiciones hacia mi renovaron mi ser interior cada mañana permitiendo superar los momentos más difíciles con gracia y prudencia.

A mi papi, a mi mamá y a mis abuelitos por siempre brindarme su oportuno consejo en amor para recorrer el camino adecuado y cumplir con satisfacción cada momento de esta carrera.

A mi Director del Trabajo de Titulación el Dr. Gerardo León, a mi Asesora del Trabajo de Titulación la Ing. Mónica Murillo, a la futura Ing. Lisseth Ortiz y al nuevo Ing. Jean Pierre Pérez; quiénes aportaron con valiosos conocimientos que enriquecieron este Trabajo de Titulación.

Damian

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xviii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xx
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxi
RESUMEN.....	xxiii
SUMMARY.....	xxiv
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	5
OBJETIVOS.....	6
General.....	6
Específicos.....	6
CAPÍTULO I.....	7
1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
1.1 Agua residual	7
1.1.1 <i>Características del agua residual</i>	7
1.1.1.1 <i>Características físicas</i>	7
1.1.1.2 <i>Características químicas</i>	9
1.1.1.3 <i>Características biológicas</i>	11
1.1.2 <i>Tipos de agua residual</i>	11
1.2 Subproductos en el tratamiento de aguas residuales	12
1.2.1 Lodo residual	13
1.2.1.1 <i>Características y composición del lodo residual</i>	13
1.2.1.1.1 <i>Características físicas</i>	14
1.2.1.1.2 <i>Características químicas</i>	15
1.2.1.1.3 <i>Características biológicas</i>	16
1.2.1.2 <i>Tipos de lodo residual</i>	17
1.3 Impacto ambiental de lodos residuales	18

1.4	Tratamiento de lodos residuales	19
<i>1.4.1</i>	<i>Dilaceración de lodos</i>	<i>19</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Desarenado de lodos</i>	<i>19</i>
<i>1.4.3</i>	<i>Mezclado de lodos</i>	<i>20</i>
<i>1.4.4</i>	<i>Almacenamiento de lodos</i>	<i>20</i>
<i>1.4.5</i>	<i>Estabilización de lodos</i>	<i>20</i>
<i>1.4.6</i>	<i>Desaguado o deshidratación de lodos</i>	<i>26</i>
<i>1.4.7</i>	<i>Incineración de lodos</i>	<i>28</i>
1.5	Sistema de tratamiento de lodos residuales	28
<i>1.5.1</i>	<i>Espesador de lodos por gravedad.....</i>	<i>28</i>
<i>1.5.1.1</i>	<i>Parámetros de diseño.....</i>	<i>29</i>
<i>1.5.1.2</i>	<i>Dimensionamiento</i>	<i>29</i>
<i>1.5.2</i>	<i>Eras de secado</i>	<i>34</i>
<i>1.5.2.1</i>	<i>Parámetros de diseño.....</i>	<i>34</i>
<i>1.5.2.2</i>	<i>Dimensionamiento</i>	<i>35</i>
1.6	Normativa ambiental aplicable.....	40
 CAPÍTULO II		43
2	MARCO METODOLÓGICO.....	43
2.1	Diseño experimental.....	43
<i>2.1.1</i>	<i>Tipo y diseño de investigación</i>	<i>43</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Unidad de análisis</i>	<i>43</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Población de estudio</i>	<i>44</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Tamaño de muestra.....</i>	<i>44</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Selección de muestra.....</i>	<i>44</i>
2.2	Metodología	44
<i>2.2.1</i>	<i>Localización de la experimentación</i>	<i>44</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Justificación de la experimentación</i>	<i>45</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Lugar del muestreo</i>	<i>45</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Caracterización del lodo residual preliminar.....</i>	<i>45</i>

2.2.4.1	<i>Medición del caudal</i>	46
2.2.4.1.1	<i>Materiales</i>	46
2.2.4.1.2	<i>Procedimiento</i>	46
2.2.4.2	<i>Acondicionamiento de la cámara de secado de lodos</i>	47
2.2.4.3	<i>Ubicación del punto de descarga</i>	47
2.2.4.4	<i>Muestreo del lodo residual preliminar</i>	47
2.2.4.4.1	<i>Materiales</i>	48
2.2.4.4.2	<i>Procedimiento</i>	48
2.2.4.5	<i>Análisis de las muestras del lodo residual preliminar</i>	49
2.2.5	<i>Diseño del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	50
2.2.5.1	<i>Procedimiento</i>	50
2.2.6	<i>Construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	51
2.2.6.1	<i>Materiales</i>	51
2.2.7	<i>Pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	53
2.2.7.1	<i>Recolección del lodo residual para el tratamiento</i>	53
2.2.7.1.1	<i>Materiales</i>	53
2.2.7.1.2	<i>Procedimiento</i>	54
2.2.7.2	<i>Caracterización del lodo residual inicial del sistema de tratamiento de lodos residuales</i>	54
2.2.7.2.1	<i>Muestreo del lodo residual inicial</i>	54
2.2.7.2.1.1	<i>Materiales</i>	54
2.2.7.2.1.2	<i>Procedimiento</i>	55
2.2.7.2.2	<i>Análisis de las muestras del lodo residual inicial</i>	55
2.2.7.3	<i>Tratamiento en el espesador de lodos por gravedad</i>	55
2.2.7.3.1	<i>Equipo</i>	56
2.2.7.3.2	<i>Procedimiento</i>	56
2.2.7.4	<i>Ensayos de espesamiento</i>	56
2.2.7.4.1	<i>Ensayos de sedimentación en cochada</i>	56

2.2.7.4.1.1	<i>Materiales</i>	56
2.2.7.4.1.2	<i>Procedimiento</i>	57
2.2.7.4.2	<i>Ensayos de sedimentación en espesador de lodos por gravedad</i>	57
2.2.7.4.2.1	<i>Materiales</i>	57
2.2.7.4.2.2	<i>Equipos</i>	58
2.2.7.4.2.3	<i>Procedimiento</i>	58
2.2.7.5	<i>Caracterización del lodo residual intermedia del sistema de tratamiento de lodos residuales</i>	59
2.2.7.5.1	<i>Muestreo del lodo residual intermedio</i>	59
2.2.7.5.2	<i>Análisis de las muestras del lodo residual intermedio</i>	59
2.2.7.6	<i>Tratamiento en las eras de secado</i>	59
2.2.7.6.1	<i>Equipo</i>	60
2.2.7.6.2	<i>Procedimiento</i>	60
2.2.7.7	<i>Ensayos en las eras de secado</i>	60
2.2.7.7.1	<i>Ensayo de desaguado en eras de secado</i>	60
2.2.7.7.1.1	<i>Materiales</i>	60
2.2.7.7.1.2	<i>Equipo</i>	61
2.2.7.7.1.3	<i>Procedimiento</i>	61
2.2.7.8	<i>Caracterización del lodo residual final del sistema de tratamiento de lodos residuales</i>	61
2.2.7.8.1	<i>Muestreo del lodo residual final</i>	62
2.2.7.8.1.1	<i>Materiales</i>	62
2.2.7.8.1.2	<i>Procedimiento</i>	62
2.2.7.8.2	<i>Análisis de las muestras del lodo residual final</i>	63
2.2.8	<i>Implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	63
2.2.8.1	<i>Procedimiento</i>	64
2.2.9	<i>Validación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	64
2.2.9.1	<i>Procedimiento</i>	64

CAPÍTULO III	66
3 ANÁLISIS DE DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
3.1 Análisis y discusión de resultados	66
3.1.1 <i>Localización de la experimentación</i>	66
3.1.2 <i>Justificación de la experimentación</i>	66
3.1.3 <i>Lugar del muestreo</i>	71
3.1.4 <i>Caracterización del lodo residual preliminar</i>	74
3.1.4.1 <i>Medición del caudal</i>	74
3.1.5 <i>Diseño del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	75
3.1.5.1 <i>Diseño del espesador de lodos por gravedad</i>	75
3.1.5.2 <i>Diseño de las eras de secado</i>	83
3.1.6 <i>Construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	90
3.1.6.1 <i>Costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	90
3.1.7 <i>Pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	93
3.1.7.1 <i>Ensayos de espesamiento</i>	93
3.1.7.1.1 <i>Ensayos de sedimentación para lodo concentrado</i>	93
3.1.7.1.2 <i>Ensayos de sedimentación para lodo diluido</i>	97
3.1.7.2 <i>Ensayos de desaguado en eras de secado</i>	101
3.1.7.2.1 <i>Ensayo de desaguado para lodo concentrado</i>	101
3.1.7.2.2 <i>Ensayo de desaguado para lodo diluido</i>	103
3.1.8 <i>Caracterización del lodo residual inicial, intermedio y final del sistema de tratamiento de lodos residuales</i>	105
3.1.9 <i>Implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	107
3.1.10 <i>Validación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio</i>	114
CONCLUSIONES	115

RECOMENDACIONES.....	116
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Afluente
A_c	Área del cono
A_{s1}	Área superficial del espesador de lodos por gravedad
A_{s2}	Área superficial del eras de secado
B	Ancho de eras
B_u	Ancho de era unitaria
B_{RU}	Base de rasqueta unitaria
C_{ss1}	Carga de sólidos del espesador de lodos por gravedad
C_{ss2}	Carga de sólidos de las eras de secado
D	Diámetro del cilindro
D_{f1}	Diámetro de la fosa de lodos
d	Día
E	Efluente
e	Eficiencia
ELG	Espesador de lodos por gravedad
EDS	Eras de secado
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
E_c	Ecuación
g	Radio del cono
H_{s1}	Altura de seguridad del espesador de lodos por gravedad
H_t	Altura total del espesador de lodos por gravedad
H_1	Altura del cilindro
H_2	Altura del cono
H_3	Altura de la fosa de lodos
h	Hora
h_{s2}	Altura de seguridad de las eras de secado
h_t	Altura total de las eras de secado
h_1	Altura de lodo
h_2	Altura de inclinación en longitud
h_3	Altura de arena
h_4	Altura de grava fina
h_5	Altura de grava gruesa
h_6	Altura de piedra
h_7	Altura de inclinación en amplitud
Kg/L	Kilogramos sobre litro

Kg/m^3	Kilogramos sobre metros cúbicos
$\text{Kg/m}^2.\text{d}$	Kilogramos sobre metros cuadrados por día
L	Longitud de era total
L_u	Longitud de era unitaria
L_{RU}	Longitud de rasqueta unitaria
L_{RT}	Longitud de rasqueta total
M_s	Flujo másico de sólidos de lodos
mg/L	Miligramos sobre litro
m	Metros
m^2	Metros cuadrados
m^3	Metros cúbicos
m^3/d	Metros cúbicos sobre día
m^3/s	Metros cúbicos sobre segundo.
N_e	Número de eras
N_{eR}	Número de rasquetas
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PVC	Policloruro de vinilo
Q_d	Caudal de diseño
$R_{F/E}$	Relación altura fosa de lodos/espesador
$R_{R/C}$	Relación base de rasqueta/cono
SS	Concentración de sólidos suspendidos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
t_{rh1}	Tiempo de retención hidráulico del espesador de lodos por gravedad
t_{rh2}	Tiempo de retención hidráulico de las eras de secado
u	Unidad
V	Volumen del cilindro
V_{ld}	Flujo volumétrico de lodo digerido
V_{le}	Volumen de lodo a extraer
V_{lex}	Volumen de lodo extraído
°	Grados
%	Porcentaje
$\%_{el}$	Porcentaje de extracción de lodo
$\%H$	Porcentaje de humedad
$\%_s$	Porcentaje de sólido
π	Pi
ρ_l	Densidad de lodo
α	Pendiente del cono

θ_A	Pendiente amplitud
θ_L	Pendiente longitud

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	Caracterización preliminar del lodo residual de la PTAR “Tiugua El Parque” previo al diseño del sistema de tratamiento.
ANEXO B	Planos de construcción.
ANEXO C	Construcción de los equipos constituyentes del sistema de tratamiento.
ANEXO D	Implementación del sistema de tratamiento en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.
ANEXO E	Toma de muestra de lodo residual de la PTAR “Cunchibamba” para las pruebas experimentales.
ANEXO F	Análisis de la muestra de lodo residual en laboratorio.
ANEXO G	Pruebas experimentales.
ANEXO H	Encuestas virtuales a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.
ANEXO I	Práctica de laboratorio en los equipos diseñados con los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1.	Área superficial del ELG.....	30
Ecuación 2-1.	Diámetro del cilindro.....	30
Ecuación 3-1.	Volumen del cilindro.....	30
Ecuación 4-1.	Altura del cilindro.....	31
Ecuación 5-1.	Altura del cono.....	31
Ecuación 6-1.	Altura de la fosa de lodos.....	31
Ecuación 7-1.	Altura total del ELG.....	32
Ecuación 8-1.	Diámetro de la fosa de lodos.....	32
Ecuación 9-1.	Radio del cono.....	32
Ecuación 10-1.	Área del cono.....	33
Ecuación 11-1.	Longitud de rasqueta unitaria.....	33
Ecuación 12-1.	Longitud de rasqueta total.....	33
Ecuación 13-1.	Base de rasqueta unitaria.....	34
Ecuación 14-1.	Carga de sólidos de las EDS.....	35
Ecuación 15-1.	Flujo másico de sólidos de lodos.....	36
Ecuación 16-1.	Flujo volumétrico de lodo digerido.....	36
Ecuación 17-1.	Volumen de lodo a extraer.....	37
Ecuación 18-1.	Volumen de lodo extraído.....	37
Ecuación 19-1.	Área superficial de las EDS.....	37
Ecuación 20-1.	Longitud de era total.....	38
Ecuación 21-1.	Longitud de era unitaria.....	38
Ecuación 22-1.	Ancho de era unitaria.....	38
Ecuación 23-1.	Altura de inclinación en longitud.....	39
Ecuación 24-1.	Altura de inclinación en amplitud.....	39
Ecuación 25-1.	Altura total de las EDS.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-3.	Resultados de la pregunta 1 de la encuesta inicial.	66
Figura 2-3.	Resultados de la pregunta 2 de la encuesta inicial.	67
Figura 3-3.	Resultados de la pregunta 3 de la encuesta inicial.	68
Figura 4-3.	Resultados de la pregunta 4 de la encuesta inicial.	68
Figura 5-3.	Resultados de la pregunta 5 de la encuesta inicial.	69
Figura 6-3.	Resultados de la pregunta 6 de la encuesta inicial.	70
Figura 7-3.	Resultados de la pregunta 7 de la encuesta inicial.	70
Figura 8-3.	Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.	94
Figura 9-3.	Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.	94
Figura 10-3.	Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.	96
Figura 11-3.	Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.	96
Figura 12-3.	Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.	98
Figura 13-3.	Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.	98
Figura 14-3.	Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.	100
Figura 15-3.	Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.	100
Figura 16-3.	Curva de deshidratación del ensayo desaguado de eras de secado para lodo concentrado.	102
Figura 17-3.	Curva de deshidratación del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido.	104
Figura 18-3.	Resultados de la pregunta 1 de la encuesta final.	108
Figura 19-3.	Resultados de la pregunta 2 de la encuesta final.	108
Figura 20-3.	Resultados de la pregunta 3 de la encuesta final.	109
Figura 21-3.	Resultados de la pregunta 4 de la encuesta final.	110
Figura 22-3.	Resultados de la pregunta 5 de la encuesta final.	110
Figura 23-3.	Resultados de la pregunta 6 de la encuesta final.	111
Figura 24-3.	Resultados de la pregunta 7 de la encuesta final.	112
Figura 25-3.	Resultados de la pregunta 8 de la encuesta final.	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1. Ubicación PTAR “Tiugua El Parque”	72
Ilustración 2-1. Ubicación PTAR “Cunchibamba”	72
Ilustración 3-1. Ubicación PTAR “El Peral”	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Composición física y química típica de un lodo residual.	13
Tabla 2-1. Concentraciones típicas y cargas de sólidos para espesadores por gravedad.	22
Tabla 3-1. Parámetros de diseño utilizados para el espesador de lodos por gravedad.	29
Tabla 4-1. Parámetros de diseño utilizados para las eras de secado.	35
Tabla 5-1. Niveles máximos permisibles de contaminantes básicos a monitorear en el punto de control.	40
Tabla 6-1. Concentración máxima de contaminantes de acuerdo con la característica de toxicidad.	41
Tabla 1-2. Análisis de muestra de lodo residual de la PTAR "Tiugua El Parque".	49
Tabla 2-2. Análisis de muestra de lodo residual inicial del sistema de tratamiento de lodos residual.	55
Tabla 3-2. Análisis de muestra de lodo residual intermedio del sistema de tratamiento de lodos residuales.	59
Tabla 4-2. Análisis de muestra de lodo residual final del sistema de tratamiento de lodos residuales.	63
Tabla 1-3. Datos obtenidos de la caracterización del lodo residual preliminar de la PTAR "Tiugua El Parque".	74
Tabla 2-3. Datos obtenidos en la medición del caudal de la PTAR "Tiugua El Parque".	74
Tabla 3-3. Resultados del diseño del espesador de lodos por gravedad.	82
Tabla 4-3. Resultados del diseño de las eras de secado.	89
Tabla 5-3. Costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio.	90
Tabla 6-3. Altura en función del tiempo del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.	93
Tabla 7-3. Resultados del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.	95
Tabla 8-3. Volumen en función del tiempo del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.	95
Tabla 9-3. Resultados del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.	97
Tabla 10-3. Altura en función del tiempo del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.	97
Tabla 11-3. Resultados del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.	99
Tabla 12-3. Volumen en función del tiempo del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.	99
Tabla 13-3. Resultados del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.	101

Tabla 14-3. Altura en función del tiempo del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado.....	101
Tabla 15-3. Resultados del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado. ..	103
Tabla 16-3. Altura en función del tiempo del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido.....	103
Tabla 17-3. Resultados del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido.	105
Tabla 18-3. Resultados de la caracterización del lodo residual inicial, intermedia y final del sistema de tratamiento de lodos residual en el espesador de lodos por gravedad..	105
Tabla 19-3. Resultados de la caracterización del lodo residual inicial, intermedia y final del sistema de tratamiento de lodos residual en las eras de secado.	105
Tabla 20-3. Resultados volumétricos de las pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residual en el espesador de lodos por gravedad.	106
Tabla 21-3. Resultados volumétricos de las pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residual en las eras de secado.....	106

RESUMEN

Se diseñó e implementó un sistema de tratamiento de lodos residuales de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) a escala de laboratorio, en la Facultad de Ciencias - Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Se inició la investigación con una caracterización preliminar del lodo residual de la PTAR - Tiugua El Parque del Cantón Ambato, cuyos resultados permitieron elegir un tratamiento compuesto de un espesador de lodos por gravedad (ELG) y unas eras de secado (EDS), dimensionados mediante parámetros de diseño y ecuaciones establecidas, obteniendo valores teóricos, corregidos al 11% y ajustados a valores de construcción. El ELG y las EDS fueron construidas en acero inoxidable y PVC, en dos talleres mecánicos del Cantón Ambato, y luego trasladados e implementados en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias - ESPOCH del Cantón Riobamba, donde se realizaron tres pruebas experimentales (sedimentación en cochada, sedimentación en ELG y desaguado en EDS) para una muestra concentrada y una diluida, obtenidas de la PTAR - Cunchibamba del Cantón Ambato. Se evaluó los sólidos suspendidos totales (SST) y el porcentaje de humedad (%H). El ELG concentró los SST en 12 horas, en la muestra concentrada de 3980 mg/L a 4245 mg/L y en la diluida de 2335 mg/L a 6703 mg/L. Las EDS redujeron los SST en el agua y el %H en el lodo en 72 horas, en la muestra concentrada de 4245 mg/L a 1003 mg/L y de 96.21% a 69.88% y en la diluida de 6703 mg/L a 48 mg/L y de 81.77% a 48.13%. Los resultados obtenidos permitieron concluir que el sistema de tratamiento propuesto es eficiente, concentrando los SST y reduciendo el %H en el lodo y reduciendo los SST en el agua. Se recomienda dar mantenimiento a los equipos después de cada ensayo.

Palabras Claves: <LODO RESIDUAL> <AGUA RESIDUAL> <SISTEMA DE TRATAMIENTO> <ESPESADOR DE LODOS POR GRAVEDAD> <ERAS DE SECADO> <ESPESAMIENTO> <SEDIMENTACIÓN> <DESAGUADO>

SUMMARY

A system of treatment of sewage sludge of a waste water treatment plant (WWTP) in laboratory-scale was designed and implemented, in the Sciences Faculty of Escuela Superior Politecnica de Chimborazo (ESPOCH). The investigation began with a preliminary characterization of the sewage sludge of the WWTP - Tiugua El Parque of Canton Ambato, whose results led to choose a treatment consisting of a sludge thickener by gravity (STG) and sludge drying beds (SDB), measuring by parameters of design and equations established, obtaining theoretical values, corrected to 11% and adjusted to values of construction. The STG and the SDB were built in stainless steel and PVC, in two mechanical workshops of the Canton Ambato, and then transferred and implemented in the Laboratory of Air of the Sciences Faculty of ESPOCH of Canton Riobamba, where three experimental evidences were made (sedimentation in flood, sedimentation in STG and drained in SDB) for a concentrated and diluted sample, obtained of the WWTP - Cunchibamba of Canton Ambato. The total suspended solids (TSS) and the percentage of humidity (%H) were evaluated. The STG concentrated the TSS in 12 hours, in the sample concentration of 3980 mg/L to 4245 mg/L and in the diluted 2335 mg/L to 6703 mg/L. The SDB reduced the TSS in the water and the %H in the sludge in 72 hours, in the sample concentration of 4245 mg/L to 1003 mg/L and of 92.21% to 69.88% and in the diluted of 6703 mg/L to 48 mg/L and of 81.77% to 48.13%. The results obtained allowed to conclude that the treatment system is efficient, concentrating the TSS and reducing the %H in the sludge and reducing the TSS in the water. It is recommended to give maintenance to the equipment after each test.

Key Words: <SEWAGE SLUDGE> <WASTE WATER> <SYSTEM OF TREATMENT>
<SLUDGE THICKENER BY GRAVITY> <SLUDGE DRYING BEDS> <THICKENING>
<SEDIMENTATION> <DRAINED>

INTRODUCCIÓN

Situación problemática

La educación superior en los últimos años ha experimentado una serie de transformaciones y controles, debido a la necesidad de garantizar una excelencia académica, con estudiantes capaces y eficientes. Es por ello, que las universidades ecuatorianas han dedicado tiempo y esfuerzo para mejorar sus instalaciones y sus métodos de enseñanza, para así contribuir con esa excelencia.

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) es una institución de educación superior de gran demanda estudiantil a nivel nacional, cada año acoge en sus instalaciones a miles de estudiantes de todo el país e incluso de otros países. Una de las principales carreras de interés es la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias, debido a que es considerada como una carrera del futuro, por lo cual ha tomado un gran auge en los últimos años.

La adecuada formación académica requiere un equilibrio entre la parte teórica y práctica, es decir, no se requiere únicamente tener los conocimientos sino saberlos utilizar para solucionar problemas reales. En la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, la parte teórica se cumple al 100%, ya que la Facultad de Ciencias cuenta con docentes altamente capacitados y todos los medios requeridos para poder replicar los conocimientos en los estudiantes. Sin embargo, la parte práctica principalmente en la asignatura de Tratamiento de Aguas, por diversos motivos los estudiantes no realizan prácticas de laboratorio.

La falta de prácticas de laboratorio perjudica a los estudiantes, ya que se estarían formando únicamente como profesionales teóricos, sin la experiencia práctica que se requiere para solucionar problemas reales.

Formulación del problema

La falta de prácticas de laboratorio se debe a la ausencia de equipos y desinterés por parte de los estudiantes.

La presente investigación sobre el sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio en la Facultad de Ciencias de la ESPOCH brinda una herramienta práctica para

complementar la parte para teórica, permitiendo a los estudiantes poner en práctica todos los conocimientos adquiridos en las aulas y así contribuir en su formación profesional.

Además, con esta investigación se intenta verificar lo siguiente:

¿Cuál será la acogida de los equipos intervinientes en el tratamiento por parte de los estudiantes de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH?

¿Cuál será la eficiencia del sistema de tratamiento de lodos propuesto?

ANTECEDENTES

La Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo nace el 20 de julio de 1978 con la integración de cuatro escuelas: Ingeniería Química, Ciencias Químicas, Bioquímica y Farmacia y, Física y Matemática, cada una con sus respectivas carreras. Sin embargo, la Escuela de Ciencias Químicas es la única que integra dos carreras: Ingeniería en Biotecnología Ambiental y Química.

Los estudiantes que pertenecen a la Facultad de Ciencias completan su formación académica a lo largo de diez semestres, durante los cuales se realizan clases presenciales, deberes, tareas, trabajos de investigación, visitas de campo, prácticas de laboratorio, entre otros. Sin embargo, no en todas las asignaturas se puede efectuar esto, en lo que respecta a la asignatura de Tratamiento de Aguas de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología, los estudiantes no realizan prácticas de laboratorio, solamente complementan la parte teórica generada en las aulas con material audiovisual, simulaciones matemáticas, artículos científicos y visitas de campo, debido principalmente a la falta de equipos.

Los estudiantes politécnicos de Chimborazo a lo largo del tiempo se han adaptado a esa realidad y han sabido utilizar lo que la universidad les ofrece y aprovecharlo al máximo. Pero, poco a poco los estudiantes de los niveles superiores y prontos a graduarse han sentido la necesidad de contribuir con algo a la universidad y principalmente a los estudiantes, ya que ellos saben cuáles son las necesidades y que les hace falta para complementar su formación académica capacitándolos para ejercer desafíos en su vida profesional.

Un ejemplo de lo anterior mencionado se da en el año 2014 con el diseño e implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales por lodos activos a escala de laboratorio por parte de dos estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, en el cual mediante pruebas experimentales obtuvieron una eficiencia del 98% en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de un agua residual proveniente de una industria quesera. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 1) Este equipo constituyó una herramienta académica para los estudiantes, sin embargo no se realizó ninguna práctica y el equipo quedó olvidado, debido a la falta de espacio físico disponible.

En el año 2015 se inauguró el edificio de laboratorios de la Facultad de Ciencias, lo cual crea un sin número de expectativas por parte de los estudiantes, en cuanto a la realización de prácticas de laboratorio. Este edificio cuenta con muchos laboratorios en distintas áreas, los cuales podrán complementar la formación de los estudiantes y además crea un espacio físico disponible para

nuevos proyectos. Es por ello, que actualmente los estudiantes están diseñando e implementando sistemas y equipos que proporcionen una herramienta práctica para la solución de problemas reales de la sociedad.

Además, este pensamiento de los estudiantes se da a nivel nacional, ellos quieren mejorar sus universidades, con estudiantes más capacitados y más eficientes y, esto se demuestra con lo siguiente:

En el año 2005 tres estudiantes de la Universidad de Guayaquil diseñaron e implementaron una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales a escala de laboratorio para una Industria Láctea, y en lo que se refiere al tratamiento de lodos construyeron cuatro unidades de tratamiento, un espesador de lodos, un tanque de digestión aerobia, unas eras de secado y un filtro prensa. Obteniendo grandes resultados de eficiencia en cuanto a la concentración de sólidos suspendidos totales y la reducción del porcentaje de humedad, contenidos en el lodo tratado. (Bermeo Garay et al, 2005, pp. 30 - 53)

En el año 2011 dos estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana diseñaron un “*Sistema automatizado para el secado, almacenamiento y despacho de lodos*”, mediante un software de simulación, en el cual se especifica todos los pasos y los costos que implica la automatización de un proceso, lo cual resultaría beneficioso y eficiente si se contara con estabilidad financiera. (Astudillo Córdova & Bermeo Barros, 2011, pp. 248 - 249)

En el año 2013 dos estudiantes de la Universidad de Cuenca evaluaron el desempeño de unos espesadores de lodos por gravedad de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, para lo cual sometieron a los equipos a diferentes regímenes de operación, con el objetivo de analizar su eficiencia al momento de aumentar la concentración de los sólidos suspendidos totales, con los resultados obtenidos proporcionaron información valiosa que servirá para el correcto manejo de espesadores de lodos por gravedad. (Espinosa Cordero & Campoverde Ortiz, 2013, p. 1)

JUSTIFICACIÓN

La adecuada formación de los estudiantes universitarios es un arduo trabajo que requiere el compromiso conjunto de autoridades, docentes y estudiantes, ya que el país y el mundo necesita profesionales capaces y eficientes, que sepan dar solución a problemas reales que inquietan a la sociedad.

Actualmente, los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) en la asignatura de Tratamiento de Aguas, no complementan los conocimientos teóricos con la parte práctica, solventan ese problema con material audiovisual, simulaciones matemáticas, artículos científicos y visitas de campo, debido a la falta de equipos, por lo que su formación académica es deficiente y está incompleta.

Es por ello, que se ha visto en la necesidad de diseñar e implementar un sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio para la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, el cual integra un tratamiento de espesado y sedimentación en un espesador de lodos por gravedad (ELG) y un tratamiento de desaguado, deshidratación y secado en unas eras de secado (EDS), los cuales constituirán una herramienta académica práctica necesaria para fortalecer los conocimientos de los estudiantes.

Los dispositivos construidos serán implementados en uno de laboratorios de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH con la finalidad de que los estudiantes empleen de manera práctica equipos para la verificación de parámetros de diseño y operación, identificando el comportamiento de diferentes tipos de lodos residuales, contribuyendo así a la mitigación integral del impacto ambiental generado por el tratamiento de aguas. Además, de complementar su formación profesional y prepararlos para enfrentar problemas reales en su vida profesional.

El sistema de tratamiento de lodos residuales de esta investigación está sustentado con información bibliográfica y práctica, para obtener la máxima eficiencia, optimizando tiempo y recursos.

OBJETIVOS

General

- Diseñar e implementar un sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio para la Facultad de Ciencias - ESPOCH.

Específicos

- Determinar la necesidad del diseño e implementación de un sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio en la Facultad de Ciencias - ESPOCH.
- Caracterizar física, química y microbiológicamente el lodo residual generado en una PTAR doméstica.
- Diseñar y construir un espesador de lodos por gravedad y unas eras de secado como elementos constituyentes del sistema de tratamiento.
- Evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento en función de la concentración de sólidos suspendidos totales y el porcentaje de humedad contenidos en el lodo tratado.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Agua residual

El agua residual es una fracción líquida compuesta de residuos, generada por una población después de haber sido utilizada para un fin determinado. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 1)

El agua residual es transportada por un sistema de alcantarillado y antes de llegar a su destino final se puede mezclar o combinar con otros tipos de aguas como “*subterráneas, superficiales y pluviales*”. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 1)

1.1.1 Características del agua residual

Las características más importantes a considerar en las aguas residuales son:

- **Características físicas:** Olor, temperatura, densidad, color, turbiedad y sólidos.
- **Características químicas:** Materia orgánica, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto y potencial hidrógeno.
- **Características biológicas:** Microorganismos patógenos. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 53-58)

La composición de un agua residual está influenciada directamente por su origen, el tiempo de retención en las etapas de la planta de tratamiento y el tipo de tratamiento que ha recibido.

1.1.1.1 Características físicas

- **Olor**

El olor en un agua residual se debe a los gases generados durante la descomposición de la materia orgánica. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 63)

El olor característico y desagradable de un agua residual es el principal causante del malestar de la población, que se opone a la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 63)

- **Temperatura**

La temperatura en un agua residual se mantiene elevada, debido al vertido directo de agua caliente por parte de industrias, domicilios u otras actividades de la población. Por lo general, el rango de temperatura del agua residual fluctúa entre 10 °C y 21 °C, dependiendo de la geografía y clima del lugar. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 70-71)

La temperatura constituye un parámetro de vital importancia, ya que interviene en el “desarrollo de la vida acuática”, principalmente actúa “sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción”, así también en la proliferación de bacterias y hongos. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 71)

.

- **Densidad**

La densidad se define como “masa por unidad de volumen” y en el agua residual desempeña un papel importante, ya que nos da una idea de la formación de lodos de sedimentación. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 72)

- **Color**

El color de un agua residual varía durante su recorrido en el sistema de alcantarillado, puede iniciar de un color gris, luego pasará a gris oscuro y finalmente a negro, debido a las condiciones casi anaerobias a las que está sometida. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 72)

El agua puede presentar dos tipos de color:

- **Color aparente:** El color aparente es el que se produce por efecto de las sustancias en soluciones, coloides y materiales en suspensión. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 14)
- **Color verdadero:** El color verdadero es el que se produce después de eliminar la turbidez de una muestra de agua. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 14)

- **Turbiedad**

La turbiedad es un parámetro que mide la transmisión de luz en el agua, mediante una “comparación entre la intensidad de luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia”. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 73)

- **Sólidos**

Los sólidos comprenden toda la fracción sólida contenida en un agua residual. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 15)

Se pueden distinguir varios tipos de sólidos y entre los cuales tenemos:

- **Sólidos totales:** Los sólidos totales corresponden a la materia sólida residual obtenida luego de que el agua se evapora a un rango temperatura comprendido entre 103 °C y 105 °C. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 59)
- **Sólidos sedimentables:** Los sólidos sedimentables corresponden a la materia sólida sedimentada naturalmente por acción de la gravedad en un contenedor cónico. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 59)
- **Sólidos disueltos:** Los sólidos disueltos corresponden a la materia sólida filtrable y están compuestos principalmente por moléculas inorgánicas, orgánicas e iones en disolución. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 60)
- **Sólidos suspendidos:** Los sólidos suspendidos corresponden a la materia sólida no filtrable que se obtiene después de someter un volumen de agua conocido a un proceso de filtración empleando un filtro de fibra de vidrio o asbesto. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 60)
- **Sólidos volátiles y sólidos fijos:** Los sólidos volátiles y sólidos fijos corresponden respectivamente a la materia sólida orgánica y a la materia sólida inorgánica o mineral de los sólidos suspendidos. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 61)

1.1.1.2 Características químicas

- **Materia orgánica**

La materia orgánica contempla todos los sólidos de origen animal, vegetal y aquellos generados por las actividades del hombre pero, relacionadas con la “*síntesis de compuestos orgánicos*”. Por lo general, están compuestos en mayor proporción por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno y, en menor proporción por azufre, fósforo y hierro. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 73)

Los grupos orgánicos principalmente presentes en un agua residual son proteínas, carbohidratos, grasas y aceites y úrea. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 73)

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un parámetro que nos indica la cantidad de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos para degradar u oxidar toda la materia orgánica contenida en el agua residual. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 80)

El principal ensayo utilizado para determinar lo anterior mencionado es la conocida demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅), es decir, es un ensayo que se da en un período de 5 días a una temperatura de 20 °C. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 80)

- **Demanda química de oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide el contenido de materia orgánica, es decir, nos indica la cantidad de oxígeno disuelto consumido por un agua residual en el proceso de oxidación, con ayuda de agentes químicos que aceleran el proceso. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 93)

- **Oxígeno disuelto (OD)**

El oxígeno disuelto (OD) es el oxígeno consumido como fuente de energía en el proceso de respiración por parte de los microorganismos aerobios y otros seres vivos. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 101)

- **Potencial hidrógeno**

El potencial hidrógeno (pH) es un parámetro que indica el grado de acidez o alcalinidad que presenta una determina sustancia, dicho valor puede afectar directamente la vida de microorganismos u otros organismos inferiores. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 18)

Para lograr un tratamiento eficiente de un agua residual se requiere que el pH presente un valor lo más neutro posible o que fluctúe en rangos de 6.5 a 8.5 UpH. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 18)

1.1.1.3 Características biológicas

- **Microorganismos patógenos**

Los microorganismos patógenos presentes en un agua residual son los principales causantes de enfermedades y se encuentran en un número considerable. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 19)

Los principales microorganismos presentes son:

- **Bacterias:** Las bacterias son microorganismos unicelulares que actúan en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 104)
 - **Hongos:** Los hongos son microorganismos “*protistas eucariotas aerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterótrofos*” que descomponen y degradan el carbono. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 104)
 - **Protozoos:** Los protozoos son microorganismos “*eucariotas, aerobios o facultativos quimioheterótrofos anaeróbicos compuestos por una célula abierta*” que purifican aguas contaminadas y mantienen el equilibrio natural entre los distintos microorganismos. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 105)
 - **Virus:** Los virus son “*partículas parasíticas compuestas por un cordón de material genético y recubiertas por proteínas*”, además actúan como parásitos ya que necesitan de un huésped para poder desarrollarse y causar una infección. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 106)
- Los virus constituyen un problema grave para la salud humana, ya que su eliminación en las plantas de tratamiento de aguas residuales requiere de dosis fuertes de químicos o utilización de tecnologías más avanzadas. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 106)

1.1.2 Tipos de agua residual

El tipo de agua residual se da en función de su procedencia y de la cual dependerá su composición. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 20)

Los tipos de agua residual más conocidos son:

- **Agua residual urbana o doméstica**

El agua residual urbana es la que se genera en los domicilios de la población, como producto de actividades cotidianas como por ejemplo lavar, cocinar, bañarse, entre otras. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 21)

Las aguas residuales urbanas pueden estar compuestas por aguas negras, aguas de lavado, aguas del sistema de alcantarillado y aguas lluvias. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 21)

La composición y carga contaminante presente en un agua residual urbana es heterogénea, debido a que ninguna población es igual, ya sea por número, costumbres o fisiología. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 21)

- **Agua residual industrial**

El agua residual industrial es la generada en todos los procesos industriales de una empresa y cuya composición y carga contaminante es variable, ya que está en función del tipo de industria y los procesos que realice la misma. (Castillo Reinoso & Guerra Huilca, 2014, p. 21)

1.2 Subproductos en el tratamiento de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales tratan una gran cantidad de aguas provenientes de distintas actividades del hombre, las cuáles poseen ciertas características contaminantes que podrían influir en el equilibrio natural del ambiente si no se tratan previos a su disposición final. (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012, p. 18)

El principal subproducto generado en el tratamiento de aguas residuales son los lodos, los cuáles poseen las mismas o quizás mayores concentraciones de contaminantes que la propia agua. (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012, p. 18) Dichas concentraciones de contaminantes dependerán del tipo de agua, características y clases de tratamiento que se le dé a la misma.

1.2.1 Lodo residual

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1994, p.1), define al lodo residual como “*residuos sólidos, semisólidos o líquidos, removidos en los tratamientos primario, secundario y avanzado del agua residual*”.

Los lodos constituyen el subproducto de mayor importancia en el tratamiento de aguas residuales, debido a la gran cantidad que se genera y al posterior tratamiento al que son sometidos previo a su disposición final. (Limón Macías, 2013, p. 9)

1.2.1.1 Características y composición del lodo residual

Las características más importantes a considerar en los lodos residuales son:

- **Características físicas:** Cantidad de lodo residual, contenido de sólidos totales, contenido de sólidos volátiles.
- **Características químicas:** Potencial hidrógeno, materia orgánica.
- **Características biológicas:** Microorganismos patógenos. (Ortiz Ramos, 2013, p. 18)

La composición de un lodo residual está influenciada principalmente por su origen, el tiempo de retención en las etapas de la planta de tratamiento y el tipo de tratamiento que ha recibido. (Ortiz Ramos, 2013, p. 18)

A continuación se resume la composición típica de un lodo residual:

Tabla 1-1. Composición física y química típica de un lodo residual.

Concepto	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Sólidos secos totales	%	2 - 8	6 - 12	0.8 - 1.2
Sólidos volátiles	% ST	60 - 80	30 - 60	59 - 88
Proteína	% ST	20 - 30	15 - 20	32 - 41
Nitrógeno (N)	% ST	1.5 - 4	1.6 - 6	2.4 - 5
Fósforo (P ₂ O ₅)	% ST	0.8 - 2.8	1.5 - 4	2.8 - 11

Tabla 1-1. Composición física y química típica de un lodo residual “Continuación”.

Potasio (K ₂ O)	% ST	0 - 1	0 - 3	0.5 - 0.7
Celulosa	% ST	8 - 15	8 - 15	-
Hierro	% ST	2 - 4	3 - 8	-
Sílice (SiO ₂)	% ST	15 - 20	10 - 20	-
pH	u. pH	5 - 8	6.5 - 7.5	6.5 - 8
Alcalinidad	mg CaCO ₃ / L	500 - 1500	2500 - 3500	580 - 1100
Ácidos orgánicos	mg HAc / L	200 - 2000	100 - 600	1100 - 1700
Contenido energético	MJ ST / Kg	23000 - 29000	9000 - 13500	18500 - 23000

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996, p. 871.

Muchos de los componentes conocidos son indispensables para considerar el uso final de los lodos procesados y del líquido separado durante el proceso.

1.2.1.1.1 Características físicas

- **Cantidad de lodo**

La cantidad de lodo puede ser expresado en forma de:

- Volumen del lodo húmedo (Contenido de agua y contenido de sólidos) (gal, L o m³).
- Masa de los sólidos secos del lodo (g, Kg o lb). (Ortiz Ramos, 2013, p. 19)

“Las fuentes de agua residual y los procesos de tratamiento del agua y lodo residual” son los dos factores que alteran la masa y el volumen del lodo. (Ortiz Ramos, 2013, p. 19)

- **Contenido de sólidos totales (ST)**

El contenido de sólidos totales en el lodo se expresa en porcentaje y abarca tanto a los sólidos suspendidos como a los sólidos disueltos. (Ortiz Ramos, 2013, p. 19)

Los factores más importantes que afectan el contenido de sólidos totales son el origen o tipo de lodo y la existencia de un tratamiento previo. (Ortiz Ramos, 2013, p. 20)

- **Contenido de sólidos volátiles (SV)**

El contenido de sólidos volátiles en el lodo abarca a todo compuesto orgánico reducido mediante un calentamiento a 550 °C (1022 °F) y en condiciones de oxidación. El contenido de sólidos volátiles se puede expresar como “*el porcentaje de los sólidos totales que son sólidos volátiles*”. (Ortiz Ramos, 2013, p. 20)

Los sólidos volátiles son los principales responsables del olor desagradable del lodo, lo que origina una proliferación de vectores. (Ortiz Ramos, 2013, p. 20)

1.2.1.1.2 Características químicas

- **Potencial hidrógeno (pH)**

El potencial hidrógeno (pH) del lodo cumple un papel fundamental en la asimilación de metales por la planta y en el control de los niveles de microorganismos patógenos y vectores. (Ortiz Ramos, 2013, p. 20)

Así:

- **pH básico (> 11.5):** Elimina bacterias.
- **pH ácido (< 6.5):** Promueve lixiviación de metales.
- **pH neutro:** Inmoviliza metales pesados. (Ortiz Ramos, 2013, p. 21)

- **Materia orgánica**

El contenido alto de materia orgánica en el lodo es indispensable para mejorar las propiedades físicas del suelo. Es muy útil cuando el objetivo del lodo sea mejorar la calidad y condición del suelo, para así agilizar su recuperación. (Ortiz Ramos, 2013, p. 21)

1.2.1.1.3 Características biológicas

- **Microorganismos patógenos**

Los microorganismos patógenos son los principales responsables de las enfermedades, por lo que representan un riesgo para la salud pública. (Ortiz Ramos, 2013, p. 21)

Dentro de los microorganismos considerados como patógenos se encuentran:

- Bacterias.
- Virus.
- Protozoos.
- Huevecillos de helmintos. (Ortiz Ramos, 2013, p. 21)

Los factores más importantes que determinan la supervivencia de los microorganismos patógenos son “*la humedad y la temperatura*”. (Ortiz Ramos, 2013, p. 22)

- **Contaminantes importantes**

Los constituyentes del lodo son los que le confieren características específicas y los diferencian entre sí. (Ortiz Ramos, 2013, p. 23)

Ciertos componentes orgánicos y minerales confieren al lodo características de fertilizantes, en cambio otros componentes resultan indeseables ya que manifiestan riesgos ambientales y sanitarios. (Ortiz Ramos, 2013, p. 23)

El grupo más representativo de contaminantes lo constituyen los metales pesados.

- **Metales pesados**

Los metales pesados son elementos electropositivos naturalmente distribuidos y movilizados por los ciclos biogeoquímicos. (Ortiz Ramos, 2013, p. 23)

La movilización y el destino final de los metales pesados en el suelo se ven influenciados por procesos edafogénicos y propiedades del mismo como: “disolución complejación, migración, precipitación, oclusión, difusión, formación de enlaces con la materia orgánica, adsorción y

absorción por la microbiota y volatilización”. Sin embargo, todo proceso puede ser alterado y controlado con ayuda de las propiedades del suelo como: “pH, potencial de redox, porcentaje de materia orgánica, capacidades de intercambio catiónico, contenidos de carbohidratos, óxidos e hidróxidos de hierro y magnesio y los minerales arcillosos”. (Ortiz Ramos, 2013, p. 23)

Los metales pesados presentes en los lodos residuales de mayor preocupación son:

- **Arsénico, cadmio, mercurio, plomo, cromo, selenio y cinc:** Riesgos para la salud humana.
- **Cobre, níquel y cinc:** Riesgos para los cultivos.
- **Nitrógeno y fósforo:** Riesgos para los ecosistemas del suelo y agua. (Ortiz Ramos, 2013, p. 25)

Los metales pesados son altamente insolubles, por lo que su concentración es mayor en el lodo que en el agua residual. Dicha concentración depende fundamentalmente del “*tipo y cantidad de los residuos industriales descargados dentro de los sistemas de tratamiento del agua residual*”. (Ortiz Ramos, 2013, p. 26)

1.2.1.2 Tipos de lodo residual

- **Lodo crudo**

El lodo crudo es un lodo que no ha sido estabilizado ni sometido a ningún tipo de tratamiento en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Espinoza Cordero & Campoverde Ortiz, 2013, p. 18)

- **Lodo primario**

El lodo primario es un lodo generado como subproducto de un tratamiento primario que se da al agua residual, en el cual se remueven únicamente sólidos. (Ortiz Ramos, 2013, p. 12)

El lodo primario facilita el espesamiento y la deshidratación, ya que posee un alto contenido de sólidos. (Ortiz Ramos, 2013, p. 12)

- **Lodo activo**

El lodo activo es un lodo generado como subproducto de un tratamiento biológico de agua residual, en el cual se elimina la materia orgánica disuelta y los nutrientes. (Espinoza Cordero & Campoverde Ortiz, 2013, p. 19)

El lodo activo se encuentra presente en forma de flóculos compuestos de biomasa muerta y viva, minerales y sustancias orgánicas. (Espinoza Cordero & Campoverde Ortiz, 2013, p. 19)

- **Lodo secundario**

El lodo secundario es un lodo generado como subproducto de un tratamiento secundario que se da al agua residual, en el cual se combinan procesos de “*clarificación primaria, tratamiento biológico y clarificación secundaria*”. (Ortiz Ramos, 2013, p. 13)

El lodo secundario posee un bajo contenido de sólidos, por lo que su espesamiento y deshidratación resultan más complicados. (Ortiz Ramos, 2013, p. 13)

- **Lodo terciario**

El lodo terciario es un lodo generado como subproducto de un tratamiento terciario avanzado que se da al agua residual, en el cual por lo general se agregan gran variedad de químicos para facilitar los procesos de tratamiento. (Ortiz Ramos, 2013, p. 13)

El espesamiento y deshidratación de un lodo terciario se logrará en un tiempo menor, debido a que éste presenta una masa y un volumen mayor, gracias a la adición de químicos tales como “*aluminio, sales, cal o polímeros orgánicos*”. (Ortiz Ramos, 2013, p. 13)

1.3 Impacto ambiental de lodos residuales

Los lodos residuales por ser subproductos generados después del tratamiento de las aguas residuales en las PTAR tienen características y composiciones diferentes que afectan o no al equilibrio natural del ambiente, debido a que concentran los contaminantes inicialmente presentes en el agua y que ahora están “*transformados o combinados con otros compuestos*”. (Municipio Metropolitano de Quito, 1999, p. 2)

Las características y composiciones de los lodos residuales serán las que condicionen su tratamiento, utilización o disposición final, por ejemplo algunos lodos pueden ser utilizados como mejoradores de suelo, otros poseen ciertos compuestos o elementos en su composición que pueden ser reutilizados y también existen lodos que al poseer una carga contaminante elevada, son considerados como residuos peligrosos, los cuales son neutralizados y confinados en lugares especializados. (Municipio Metropolitano de Quito, 1999, p. 2)

Los principales impactos ambientales que generan los lodos residuales son la contaminación a los recursos suelo y agua, debido a un ineficiente tratamiento en las PTAR. Además, dependiendo de su característica, composición y cantidad afectarán en mayor o menor proporción al equilibrio del ambiente. Los lodos son colocados directamente en grandes superficies de terreno (suelo) y si no son tratados adecuadamente pueden contaminar todo a su alrededor, además podrían percolar a través del suelo y llegar a las aguas subterráneas, contaminándolas también. Otros lodos que aún se encuentran en las PTAR sin tratamiento pueden llegar al suelo o a cuerpos de agua, por efecto de las condiciones climáticas del lugar. (Municipio Metropolitano de Quito, 1999, pp. 3 - 10)

1.4 Tratamiento de lodos residuales

Para el tratamiento de lodos residuales se debe considerar principalmente el origen del lodo, es decir, las características que éste posee. Un parámetro muy importante a considerar es el contenido de sólidos, ya que de éste dependerá el “*diseño y dimensiones de bombas, tuberías y equipos utilizados para su manejo y tratamiento*”. (Limón Macías, 2013, p. 18)

1.4.1 Dilaceración de lodos

La dilaceración de lodos permite que las partículas grandes de sólidos presentes en el lodo se desintegren en partículas de menor tamaño, con el objetivo de evitar obstrucciones que puedan afectar las máquinas y equipos presentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 899 - 900)

1.4.2 Desarenado de lodos

El desarenado de lodos es un proceso en el cual mediante un movimiento se separan las partículas de arena del lodo orgánico, lo cual es necesario cuando en las plantas de tratamiento de aguas residuales no se cuenta con un proceso de desarenado previo a la decantación o exista alguno pero que funciona de forma ineficiente. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 900 - 901)

El desarenado del lodo facilita y mejora los posteriores procesos de tratamiento que se le tenga pensado dar el lodo, por ejemplo el espesamiento. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 900)

1.4.3 Mezclado de lodos

El mezclado de lodos es un proceso que permite combinar las características y composiciones de los diferentes tipos de lodo, con el objetivo de mejorar sus propiedades y así obtener un lodo de mejor calidad y que pueda facilitar sus posteriores tratamientos. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 901 - 902)

1.4.4 Almacenamiento de lodos

El almacenamiento de lodos es un proceso requerido para reducir las incertidumbres en cuanto a la producción del lodo y así poder acumularlos en las plantas de tratamiento de aguas residuales cuando no estén funcionando. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 903)

El tiempo de almacenamiento del lodo dependerá de la cantidad que se genere del lodo y del tamaño de la planta de tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 903)

1.4.5 Estabilización de lodos

La estabilización es un proceso que se fundamenta en dos principios importantes:

- **Reducción de volumen:** Se logra mediante algunas técnicas como: “*espesamiento, deshidratación, escurrido mecánico, incineración*”, entre otros.
- **Reducción del poder se fermentación:** Significa reducir la actividad biológica y el contenido de microorganismos patógenos, mediante procesos como: “*digestión anaerobia o aerobia, estabilización química*”, entre otros. (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012, p. 19)

El proceso o método a utilizar para la estabilización del lodo dependerá de diversos factores como la cantidad y calidad del lodo a tratar, las condiciones específicas del lugar y, principalmente el factor económico. (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012, p. 20)

Entre los principales procesos de estabilización utilizados tenemos:

- **Digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso que ocurre en ausencia de oxígeno molecular, en el cual se producen dos fases:

- **Fermentación ácida:** Proceso en el cual compuestos orgánicos complejos sufren procesos de hidrólisis y biooxidación, generando ácidos volátiles.
- **Fermentación metánica:** Proceso en el cual se da una producción de gas metano, anhídrido carbónico y ácidos orgánicos simples a partir de dichos ácidos volátiles, con ayuda de bacterias anaerobias. (Ramalho, et al, 1996, p. 503)

- **Digestión aerobia**

La digestión aerobia es un proceso en el cual una mezcla de lodo digerible de la clarificación primaria y lodo del tratamiento biológico aerobio es sometida a una aireación por un tiempo considerable, con el propósito de destruir células y reducir el contenido de sólidos volátiles en suspensión. Esta reducción se produce mediante “*la conversión, por oxidación, de una parte sustancial del lodo en productos volátiles (CO₂, NH₃, H₂)*”, con ayuda de microorganismos aerobios. (Ramalho, et al, 1996, p. 533)

- **Adición de químicos**

La adición de productos químicos facilita la coalescencia de las partículas del lodo y mejora su filtración. Puede ir precedida de un proceso de levigación, que es un lavado a contracorriente, lo que reduce la alcalinidad y disminuye el contenido del químico. Además, el químico posee acción bactericida, que provoca un “*bloqueo temporal de fermentaciones ácidas*”. (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012, p. 19)

- **Espesado de lodos**

El espesado de lodos es un proceso utilizado para aumentar la concentración del lodo en función de su contenido de sólidos. Dicho proceso provoca una separación entre la fase sólida y líquida que será eliminada posteriormente. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 905)

El espesado también provoca que el volumen del lodo se reduzca significativamente, lo cual es de gran beneficio ya que facilita el posterior tratamiento que se le dé al lodo y sobre todo influye en las condiciones económicas que dependerán del transporte del lodo y del tamaño de los equipos y máquinas requeridas para su tratamiento. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 906 - 907)

El espesado del lodo requiere una separación de fases que se logran por lo general mediante procesos físicos como:

- **Espesado por gravedad**

El espesado por gravedad es un proceso que se realiza en un tanque, por lo general de sección circular, el cual posee una cámara de alimentación central, en donde el lodo residual es transportado para ser disipado uniformemente sobre la superficie del tanque y tras un periodo de retención hidráulico, el lodo empieza a sedimentar y compactar en la zona inferior. El lodo compactado se retira del fondo del tanque generalmente a través de barrederas o bombas Arquímedes, mientras el líquido clarificado es recirculado a los procesos anteriores mediante un vertedero acoplado a una tubería. (Bermeo Garay, et al, 2005, pp. 23 - 40; Espinoza Cordero & Campoverde Ortiz, 2013, pp. 22 - 23)

Tabla 2-1. Concentraciones típicas y cargas de sólidos para espesadores por gravedad.

Tipo de fango	Concentración de fango (%)		Carga de sólidos para espesadores por gravedad (Kg/m ² xd)
	Sin espesar	Espesado	
Por separado			
Lodo primario	2 - 7	5 - 10	88 - 136
Lodo de filtro percolador	1 - 4	3 - 6	34 - 49
Lodo de RBC	1 - 3.5	2 - 5	34 - 49
Lodo activado con aire	0.5 - 1.5	2 - 3	12 - 34
Lodo activado con oxígeno puro	0.5 - 1.5	2 - 3	12 - 34
Lodo activado de aireación prolongada	0.2 - 1	2 - 3	24 - 34
Lodo primario digerido por vía anaerobia en el digester primario	8	12	122
Conjuntamente			
Lodo primario y de filtro percolador	2 - 6	4 - 9	58 - 98
Lodo primario y lodo procedente de RBCs	2 - 6	4 - 8	49 - 78
Lodo primario de aireación modificada	3 - 4	5 - 10	58 - 98
Lodo primario y activado por aire	2 - 5	2 - 8	25 - 49

Tabla 2-1. Concentraciones típicas y cargas de sólidos para espesadores por gravedad “Continuación”.

Lodo activado en exceso y lodo procedente de filtros percoladores	0.5 - 2.5	2 - 4	12 - 34
Lodos activados y lodos primarios digeridos por vía anaerobia	4	8	68
Lodo acondicionado térmicamente			
Lodo primario	3 - 6	12 - 15	195 - 245
Lodo primario y exceso de lodos activados	3 - 6	8 - 15	136 - 245
Exceso de lodos activados	0.5 - 1.5	6 - 10	98 - 136

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996, p. 914.

– **Espesado por flotación**

El espesado por flotación es un proceso en el cual se introduce aire disuelto al lodo a una presión específica. Posteriormente, esta mezcla entre lodo y aire circula a través de un tanque que debe estar abierto para que la presión atmosférica provoque la salida de aire de la solución a manera de pequeñas burbujas divididas, que se unirán a las partículas sólidas presentes en el lodo y luego lo arrastrarán a la superficie, permitiendo que éstas floten para finalmente ser eliminadas con ayuda de un dispositivo especializado desnatado. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 909; Campoverde Ortiz, 2013, p. 22)

– **Espesado por centrifugación**

El espesado por centrifugación es un proceso que se aplica para espesar y deshidratar lodos y, su principio de funcionamiento se basa en la sedimentación de partículas mediante la aplicación de fuerzas centrífugas generadas por un equipo llamado centrífuga. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 910)

El espesado por centrifugación genera un considerable coste de energía y mantenimiento de equipos, por lo que su aplicación sólo resulta atractiva siempre y cuando las plantas de tratamiento de aguas residuales posean una gran capacidad de tratamiento. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 911)

– **Espesado por filtros de banda por gravedad**

El espesado por filtros de banda por gravedad es una tecnología relativamente nueva y se basa en la deshidratación del lodo con ayuda de filtros de banda, que desplazan uniformemente el lodo sobre rodillos que se mueven gracias a la acción de un motor. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 911)

Durante el transcurso de circulación del lodo sobre la banda, éste se va cortando y posteriormente formando orificios que permiten la salida del agua. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 911)

– **Espesado por tambor rotativo**

El espesado por tambor rotativo es un proceso que se basa en el acondicionamiento del lodo, el cual es mezclado con polímeros en un tambor de mezcla con el objetivo de estabilizarlo y acondicionarlo para luego hacerlo circular a través de unos tamices cilíndricos rotativos, que permiten la separación de los sólidos floculados presentes en el agua. El lodo espesado es eliminado por el tambor rotativo y el agua es filtrada por los tamices. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 911 - 911)

• **Sedimentación**

La sedimentación es un proceso utilizado también como una forma o manera para espesar el lodo, es decir, concentrar los sólidos contenidos en el lodo. Esto se logra mediante una separación entre la fase líquida y la fase sólida por diferencia de pesos específicos de las partículas. (Cabezas Yanes, 2011, p. 21)

Se pueden distinguir tres clases de sedimentación:

– **Sedimentación discreta**

La sedimentación discreta es la que ocurre por acción de la gravedad y se da solamente a partículas en suspensión con una concentración de sólidos baja. Dichas partículas se sedimentan solas sin ningún tipo de interferencia de otras partículas y obedecen a la Ley de Newton que supone que todas las partículas son esféricas y homogéneas. (Cabezas Yanes, 2011, p. 22)

En la sedimentación discreta las partículas a medida que se van sedimentando adquieren una mayor velocidad de aceleración que se pierde cuando las fuerzas de sedimentación se equilibran con las fuerzas de resistencia del líquido, produciendo una velocidad de sedimentación que se mantiene constante. (Cabezas Yanes, 2011, p. 22)

– **Sedimentación con floculación**

La sedimentación con floculación es provocada por acción de la coalescencia de partículas, es decir, la unión o combinación entre partículas lo que genera un aumento de la velocidad debido al aumento de tamaño. (Cabezas Yanes, 2011, p. 22)

– **Sedimentación por zonas o en cohada**

La sedimentación por zonas es un proceso que permite identificar las distintas fases o zonas presentes en un determinado tipo de lodo, y cada una de ellas se diferencian entre sí dependiendo de la concentración de partículas sólidas presentes y de la velocidad que tardarán en sedimentarse. (Cabezas Yanes, 2011, p. 24)

Las suspensiones que poseen concentraciones de partículas sólidas uniformes al momento de ser colocadas en contenedores o recipientes generalmente cilíndricos son diseñados para propiciar una sedimentación, dichas partículas sólidas comienzan a descender debido a la diferencia de peso específico y permiten evidenciar una interfase (interfase a) formada por partículas sólidas en el fondo y un líquido en la superficie. (Cabezas Yanes, 2011, p. 24)

El líquido presenta en la parte inferior una zona llamada interfacial, la cual contiene una concentración de partículas sólidas uniforme que se precipitan a una velocidad constante. En esta sedimentación las partículas sólidas empiezan aplastarse unas a otras generando una compactación en el fondo del recipiente cilíndrico formando así la conocida zona de compactación que está rodeada por otra interfase (interfase b) que se mueve a una velocidad constante. (Cabezas Yanes, 2011, p. 24)

Otra zona que se puede evidenciar en este tipo de sedimentación es la zona de transición formada entre la zona de compactación y la zona interfacial; aquí las partículas sólidas se van a sedimentar a una velocidad menor ya que la suspensión genera una resistencia formada por su aumento de densidad y viscosidad, provocando así un cambio en su concentración. (Cabezas Yanes, 2011, p. 24)

Las dos interfases (a y b) formadas en este tipo de sedimentación se mueven en el interior del recipiente cilíndrico a una velocidad constante, la diferencia entre ellas es que la interfase a se mueve hacia abajo y la interfase b hacia arriba. Sin embargo, va a existir un momento crítico en el cual la zona interfacial se choque con la zona de compactación, provocando que la zona de

transición desaparezca. En dicho momento las partículas sólidas sedimentadas van a poseer una concentración uniforme o crítica. (Cabezas Yanes, 2011, p. 25)

Finalmente, con la compactación de las partículas sólidas se produce el espesado del lodo hasta alcanzar una concentración final. (Cabezas Yanes, 2011, p. 25)

La velocidad de sedimentación crítica hace referencia al momento crítico, dado por el punto de cruce entre las tangentes, cuyo trazo perpendicular con la curva generará la concentración crítica. Cabe mencionar que la velocidad crítica siempre es menor que la velocidad de sedimentación.

1.4.6 Desaguado o deshidratación de lodos

El desaguado es un proceso requerido necesariamente para la remoción del agua contenida en el lodo, con el propósito de reducir su volumen y facilitar su disposición final.

Como resultado de este proceso se obtiene una torta o material sólido y un sobrenadante con elevada carga contaminante. (Limón Macías, 2013, p. 19)

El desaguado de lodos utiliza equipos que reducen el contenido de humedad aplicando diversas técnicas, ya sean naturales como la evaporación o mecánicas como la filtración, centrifugación y el prensado. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 969)

La elección del equipo de deshidratación se ve influenciada por las propiedades del lodo y por el espacio requerido. Actualmente, en el mercado existen una gran variedad de equipos que aplican diferentes técnicas de deshidratación, una más eficiente que otra. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 971)

Así tenemos:

- **Filtración al vacío**

La filtración al vacío es un proceso en el cual se aplica un vacío en un medio filtrante, lo que ocasiona que la presión atmosférica mueva la fase líquida del lodo hacia un medio poroso, permitiendo así la separación entre el agua y el lodo. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 972)

- **Centrifugación**

La centrifugación es un proceso que separa líquidos de distinta densidad y sólidos, por lo que puede ser aplicable al espesamiento y deshidratación de lodos. La centrifugación provoca la sedimentación de partículas con ayuda de fuerzas centrífugas. (Metcalf & Eddy, 1996, pp. 973 - 974)

- **Filtros de banda**

Los filtros banda permiten la deshidratación del lodo mediante la aplicación de una presión mecánica. Una vez que el lodo se haya espesado, este es transportado a una zona de presión relativamente baja para ser comprimido y posteriormente pasa a una zona de mayor presión con ayuda de bandas de rodillos donde es sometida a esfuerzos tangenciales y prensado que eliminan la última cantidad de agua aún presente en el lodo. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 978)

- **Filtros prensa**

Los filtros prensa son dispositivos que provocan la deshidratación del lodo aplicando una presión elevada que ocasiona la salida del agua contenida en el lodo. El agua resultante del proceso de filtrado en la mayoría de casos puede ser recuperada o recirculada; mientras los lodos pueden ser aprovechados o eliminados según indique su caracterización. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 982)

- **Eras de secado**

Las eras de secado son unas estructuras por lo general rectangulares utilizadas para la deshidratación y desaguado de lodos residuales, las cuáles están constituidas por un material filtrante formado por arena, grava y piedras. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 985)

El tiempo de deshidratación y desaguado del lodo residual depende del clima del lugar y de las condiciones del sólido o lodo. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 985) Por lo general, se busca “*reducir el contenido del agua en menos del 85%*”. (Romero Rojas, 2002, p. 817)

- **Lagunas de secado**

Las lagunas de secado son grandes superficies huecas o cunetas de tierras, en las cuales se deposita uniformemente el lodo residual por toda la superficie del terreno, con el objetivo de

eliminar el agua por procesos de evaporación y el agua sobrenadante se decanta a través de vertederos. Además, se concentran los sólidos y finalmente son removidos. (Metcalf & Eddy, 1996, p. 992; Romero Rojas, 2002, p. 834)

1.4.7 Incineración de lodos

La incineración de lodos es un proceso térmico, en el cual se somete al lodo a elevadas temperaturas y así combustionar los sólidos, por lo general este proceso se utiliza cuando el lodo ya está desaguado pero no estabilizado. (Romero Rojas, 2002, p. 843)

1.5 Sistema de tratamiento de lodos residuales

Para diseñar el sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio partimos de la caracterización preliminar del lodo residual contenidos en la fosa séptica de la PTAR “Tiagua El Parque” generando los datos de la concentración de sólidos suspendidos totales y el caudal para el dimensionamiento de los elementos del sistema.

El sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio propuesto combina los principios básicos del tratamiento de lodos que son la estabilización y el desaguado o deshidratado, mediante dos equipos que son:

- Espesador de lodos por gravedad.
- Eras de secado.

1.5.1 Espesador de lodos por gravedad

El espesador de lodos por gravedad como unidad de estabilización de lodos, es un tanque de sección circular que permite la sedimentación de las partículas sólidas contenidas en el agua, está compuesto por un sistema de agitación con dos paletas que se mueven por la acción mecánica de un moto reductor, el cual permite la homogeneización de la muestra y el traslado de las partículas compactadas hacia la parte inferior denominada zona de lodos. El lodo compactado se retira del fondo del tanque por acción de la gravedad mediante una tubería hacia la siguiente unidad de tratamiento. Además, el equipo está compuesto por un sistema de tuberías, con válvulas de paso, que permiten la circulación de la muestra. Así también, posee una pantalla de vidrio, que permite visualizar todo el proceso de espesamiento que ocurre en el interior del tanque.

El dimensionamiento del espesador de lodos por gravedad está en función a los parámetros de diseño y las ecuaciones desarrolladas según Metcalf & Eddy, 1996, p. 669.

1.5.1.1 Parámetros de diseño

A continuación se resumen los parámetros de diseño utilizados para el dimensionamiento del espesador de lodos por gravedad:

Tabla 3-1. Parámetros de diseño utilizados para el espesador de lodos por gravedad.

Parámetro	Símbolo	Valor		Unidad
		Rango	Típico	
Carga de sólidos del ELG para lodo primario	C_{SS1}	90 - 150	140	Kg/m ² .d
Carga de sólidos del ELG para lodo mixto	C_{SS1}	40 - 60	60	Kg/m ² .d
Tiempo de retención hidráulico del ELG	t_{rh1}	1.5 - 2.5	2	h
Pendiente del cono	α	10 - 45	20	°
Altura de seguridad del ELG	H_{s1}	0.5 - 1.5	1	m
Número de rasquetas	$N_{\phi R}$	2 - 4	2	u
Relación altura fosa de lodos/espesador	$R_{F/E}$	10 - 30	20	%
Relación base de rasquetas/cono	$R_{R/C}$	5 - 15	10	%

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996, p. 669.

1.5.1.2 Dimensionamiento

El diseño del espesador de lodos por gravedad fue desarrollado de la siguiente manera:

- Cálculo del área superficial del ELG (A_{s1}):

El área superficial del espesador de lodos por gravedad se determinó a partir de los datos de diseño de la caracterización preliminar correspondientes a:

Q_d = Caudal de diseño (m^3/d)

SS = Concentración de sólidos suspendidos totales (kg/m^3)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

C_{ssl} = Carga de sólidos del ELG ($kg/m^2.d$)

Así tenemos:

$$A_{sel} = \frac{Q_d \times SS}{C_{ss}}$$

(Ec. 1-1.)

- Cálculo del diámetro del cilindro (D):

La dimensión del diámetro del espesador de lodos por gravedad se obtuvo geoméricamente, en donde interviene:

A_{s1} = Área superficial del ELG (m^2)

Así tenemos:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A_{s1}}{\pi}}$$

(Ec. 2-1.)

- Cálculo del volumen del cilindro (V):

El volumen del espesador por gravedad se obtuvo a partir de:

Q_d = Caudal de diseño (m^3/d)

Y el parámetro de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

t_{rh1} = Tiempo de retención hidráulico del ELG (d)

Así tenemos:

$$V = Q_d \times t_{rh1}$$

(Ec. 3-1.)

- Cálculo de la altura del cilindro (H_1):

La altura del cilindro se calculó geoméricamente a partir de:

V = Volumen del cilindro (m^3)

A_{s1} = Área superficial del ELG (m^2)

Así tenemos:

$$H_1 = \frac{V}{A_{s1}}$$

(Ec. 4-1.)

- Cálculo de la altura del cono (H_2):

La altura del cono del espesador por gravedad se determinó geoméricamente, en donde interviene:

D = Diámetro del cilindro (m)

Y el parámetro de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

α = Pendiente del cono ($^\circ$)

Así tenemos:

$$H_2 = \tan \alpha \times \frac{D}{2}$$

(Ec. 5-1.)

- Cálculo de la altura de la fosa de lodos (H_3):

La altura de la fosa de lodos se determinó geoméricamente, en donde interviene:

H_1 = Altura del cilindro (m)

H_2 = Altura del cono (m)

Y los parámetros de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

H_{s1} = Altura de seguridad del LES (m)

$R_{F/E}$ = Relación altura fosa de lodos/espesador ($\%$)

Así tenemos:

$$H_3 = (H_1 + H_2 + H_{s1}) \times R_{F/E}$$

(Ec. 6-1.)

- Cálculo de la altura total del ELG (H_t):

La altura total del espesador de lodos por gravedad se determinó a partir de la sumatoria de las alturas que componen el espesador de lodos por gravedad que corresponden a:

H_1 = Altura del cilindro (m)

H_2 = Altura del cono (m)

H_3 = Altura de la fosa de lodos (m)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

H_{s1} = Altura de seguridad del ELG (m)

Así tenemos:

$$H_t = (H_1 + H_2 + H_3 + H_{s1})$$

(Ec. 7-1.)

- Cálculo del diámetro de la fosa de lodos (D_{fl}):

El diámetro de la fosa de lodos se determinó en función de:

D = Diámetro del cilindro (m)

Así tenemos:

$$D_{fl} = 0.20 \times D$$

(Ec. 8-1.)

- Cálculo del radio del cono (g):

El radio del cono se calculó geoméricamente a partir de:

D = Diámetro del cilindro (m)

H_2 = Altura del cono (m)

Así tenemos:

$$g = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (H_2)^2}$$

(Ec. 9-1.)

- Cálculo del área del cono (A_c):

El área del cono se determinó geoméricamente, en donde interviene:

D = Diámetro del cilindro (m)

g = Radio del cono (m)

Así tenemos:

$$A_c = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right) \times g$$

(Ec. 10-1.)

- Cálculo de la longitud de rasqueta unitaria (L_{RU}):

La longitud de la rasqueta unitaria se determinó tomando en cuenta:

H_t = Altura total del ELG (m)

Así tenemos:

$$L_{RU} = 0.1 \times H_t$$

(Ec. 11-1.)

- Cálculo de la longitud de rasqueta total (L_{RT}):

La longitud de la rasqueta total se calculó a partir de:

L_{RU} = Longitud de rasqueta unitaria (m)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

$N_{\hat{R}}$ = Número de rasquetas (u)

Así tenemos:

$$L_{RT} = L_{RU} \times N_{\hat{R}}$$

(Ec. 12-1.)

- Cálculo de la base de rasqueta unitaria (B_{RU}):

La base de la rasqueta total se calculó geoméricamente a partir de:

A_c = Área del cono (m^2)

L_{RT} = Longitud de rasqueta total (m)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 3-1. correspondiente a:

R_{RC} = Relación base de rasqueta/cono (%)

Así tenemos:

$$B_{RU} = \frac{R_{R/C} \times A_c}{L_{RT}}$$

(Ec. 13-1.)

1.5.2 Eras de secado

Las eras de secado diseñado como unidad de desaguado y deshidratado de lodos cuenta con dos contenedores rectangulares con doble pendiente o caída, que están compuestos por un sistema de calor controlado por un dímero, que regula la intensidad de calor generada por dos focos, además posee un medio filtrante constituido por arena, grava fina, grava gruesa, piedras y un falso fondo de soporte. También posee un sistema de tuberías que permiten evacuar el agua filtrada, al final del tratamiento, mientras que el lodo seco es retenido sobre el medio filtrante.

El dimensionamiento de las eras de secado se da en función a los parámetros de diseño y las ecuaciones desarrolladas según Metcalf & Eddy, 1996, p. 987.

1.5.2.1 Parámetros de diseño

A continuación se resumen los parámetros de diseño empleados para el dimensionamiento de las eras de secado:

Tabla 4-1. Parámetros de diseño utilizados para las eras de secado.

Parámetro	Símbolo	Valor		Unidad
		Rango	Típico	
Densidad de lodo	ρ_l	-	1.04	Kg/L
Porcentaje de sólido	$\%_s$	-	8	%
Tiempo de retención hidráulico de las EDS (Clima frío)	t_{rh2}	30 - 60	50	d
Tiempo de retención hidráulico de las EDS (Clima cálido)	t_{rh2}	5 - 30	20	d
Porcentaje de extracción de lodo	$\%_{e1}$	20 - 80	50	%
Altura del lodo	h_1	-	0.15	m
Altura de arena	h_3	-	0.15	m
Altura de grava fina	h_4	-	0.15	m
Altura de grava gruesa	h_5	-	0.15	m
Altura de piedra	h_6	-	0.15	m
Altura de seguridad de las EDS	h_{s2}	0.5 - 1	0.5	m
Ancho de era unitaria	B_u	1 - 3.5	3	m
Número de eras	N_e	2 - 10	6	u
Pendiente longitud	θ_L	1 - 5	2	°
Pendiente amplitud	θ_A	5 - 10	8	°

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996, p. 987.

1.5.2.2 Dimensionamiento

- Cálculo de la carga de sólidos de las EDS (C_{ss2}):

La carga de sólidos se determinó a partir de los datos de diseño de la caracterización preliminar correspondientes a:

Q_d = Caudal de diseño

SS = Concentración de sólidos suspendidos totales

Así tenemos:

$$C_{ss2} = Q_d \times SS \quad (\text{Ec. 14-1.})$$

- Cálculo del flujo másico de sólidos de lodos (M_s):

El flujo másico de sólidos de lodos se obtuvo a partir de:

C_{ss2} = Carga de sólidos de las EDS (Kg/d)

Así tenemos:

$$M_s = 0.325 \times C_{ss2} \quad (\text{Ec. 15-1.})$$

- Cálculo del flujo volumétrico de lodo digerido (V_{ld}):

El flujo volumétrico de lodo digerido se calculó a partir de:

M_s = Flujo másico de sólidos de lodos (kg/d)

Y empleando los parámetros de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

ρ_l = Densidad de lodo (kg/m^3)

$\%_s$ = Porcentaje de sólidos (%)

Así tenemos:

$$V_{ld} = \frac{M_s}{\rho_l \times \%_s} \quad (\text{Ec. 16-1.})$$

- Cálculo del volumen de lodo a extraer (V_{le}):

El volumen de lodo a extraer se determinó empleando:

V_{ld} = Flujo volumétrico de lodo digerido (m^3/d)

Y el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

t_{rh2} = Tiempo de retención hidráulico de las EDS (d)

Así tenemos:

$$V_{le} = V_{ld} \times t_{rh2} \quad (\text{Ec. 17-1.})$$

- Cálculo del volumen de lodo extraído (V_{lex}):

El volumen de lodo a extraer se determinó empleando:

$$V_{le} = \text{Flujo volumétrico de lodo a extraer } (m^3/d)$$

Y el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

$$\%_{el} = \text{Porcentaje de extracción de lodo } (\%)$$

Así tenemos:

$$V_{lex} = V_{le} \times \%_{el} \quad (\text{Ec. 18-1.})$$

- Cálculo del área superficial de las EDS (A_{s2}):

El área superficial del eras de secado fue obtenida a partir de los datos que corresponden a:

$$V_{lex} = \text{Volumen de lodo extraído } (m^3)$$

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

$$h_l = \text{Altura del lodo } (m)$$

Así tenemos:

$$A_{s2} = \frac{V_{lex}}{h_l} \quad (\text{Ec. 19-1.})$$

- Cálculo de la longitud de era total (L):

La longitud de era total se calculó geométricamente a partir de:

$$A_{s2} = \text{Área superficial de las EDS } (m^2)$$

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

$$B = \text{Ancho de eras } (m)$$

Así tenemos:

$$L = \frac{A_s^2}{B}$$

(Ec. 20-1.)

- Cálculo de la longitud de era unitaria (L_u):

La longitud de era unitaria se calculó geoméricamente mediante:

L = Longitud de era total (m)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

N_e = Número de eras (u)

Así tenemos:

$$L_u = \frac{L}{N_e}$$

(Ec. 21-1.)

- Cálculo del ancho de era unitaria (A_u):

El ancho de era unitaria se calculó geoméricamente empleando los parámetros de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

B = Ancho de eras (m)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

N_e = Número de eras (u)

Así tenemos:

$$B_u = \frac{B}{N_e}$$

(Ec. 22-1.)

- Cálculo de la altura de inclinación en longitud (h_2):

La altura de inclinación en longitud se determinó geoméricamente en donde interviene:

L_u = Longitud de era unitaria (m)

Y el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

θ_L = Pendiente longitud ($^\circ$)

Así tenemos:

$$h_2 = \tan\theta_L \times L_u \quad (\text{Ec. 23-1.})$$

- Cálculo de la altura de inclinación en amplitud (h_7):

La altura de inclinación en longitud se determinó geoméricamente en donde interviene:

B_u = Base de era unitaria (m)

Y el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

θ_A = Pendiente amplitud ($^\circ$)

Así tenemos:

$$h_7 = \tan\theta_A \times B_u \quad (\text{Ec. 24-1.})$$

- Cálculo de la altura total de las EDS (h_t):

La altura total se determinó a partir de la sumatoria de las alturas que componen el eras de secado que corresponden a:

h_2 = Altura de inclinación en longitud (m)

h_7 = Altura del inclinación en amplitud (m)

Y empleando el parámetro de diseño de la Tabla 4-1. correspondiente a:

h_1 = Altura de lodo (m)

h_3 = Altura de arena (m)

h_4 = Altura de grava gruesa (m)

h_5 = Altura de grava fina (m)

h_6 = Altura de piedra (m)

h_{s2} = Altura de seguridad del LES (m)

Así tenemos:

$$h_t = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_{s2}) \quad (\text{Ec. 25-1.})$$

1.6 Normativa ambiental aplicable

Los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son desechos sólidos y dependiendo de sus características y composición pueden ser considerados como peligrosos o no peligrosos; su regulación y control está a cargo del Ministerio del Ambiente, en función de Normas Técnicas que establecen límites y máximos permisibles de sustancias o contaminantes, previos a su disposición final.

El Libro VI Anexo 6 del TULSMA establece todas las directrices y consideraciones que se deben tomar en cuenta para el manejo de los desechos sólidos no peligrosos.

Tabla 5-1. Niveles máximos permisibles de contaminantes básicos a monitorear en el punto de control.

Sustancia química	Límite máximo permisible (mg/L)
Arsénico	0.05
Bario	1.0
Benceno	0.005
Cadmio	0.01
Cloruro de vinilo	0.002
Cromo hexavalente	0.05
2, 4 Diclorofenil ácido acético	0.1
1, 4 Diclorobenceno	0.075
1, 2 Dicloroetano	0.005
1, 1 Dicloroetileno	0.007
Endrin	0.0002
Fluoruros	4.0
Lindano	0.004
Mercurio	0.002
Metoxicloro	0.1
Nitratos	10.0
Plata	0.05
Plomo	0.05
Selenio	0.01

Tabla 5-1. Niveles máximos permisibles de contaminantes básicos a monitorear en el punto de control “Continuación”.

Tetracloruro de carbono	0.005
Toxafeno	0.005
1, 1, 1 triclorometano	0.2
Tricloroetileno	0.005
2, 4, 5 Triclorofenil ácido acético	0.01

Fuente: Libro VI Anexo 6 TULSMA, 2015, pp. 41-42.

El Acuerdo Ministerial 026 emitido como registro oficial el 12 de mayo del 2008 establece todos los procedimientos requeridos para transportar, gestionar y registrar desechos peligrosos y, dentro del cual se clasifica a los lodos provenientes de las PTAR como un desecho peligroso. Los desechos se consideran peligrosos dependiendo de sus características de peligrosidad en función de los criterios de inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad e infecciosidad. Sin embargo, para que un desecho no sea considerado como peligroso no debe superar la concentración máxima de los siguientes contaminantes expresados en la siguiente tabla:

Tabla 6-1. Concentración máxima de contaminantes de acuerdo con la característica de toxicidad.

Contaminante	Límite máximo permisible (mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Benceno	0.5
Cadmio	1.0
Clordano	0.03
Cloruro de vinilo	0.02
Clorobenceno	100.0
Cloroformo	6.0
o-Cresol	200.0
m-Cresol	200.0
p-Cresol	200.0
Cresol	200.0
Cromo	5.0
1, 4 Diclorobenceno	7.5

Tabla 6-1. Concentración máxima de contaminantes de acuerdo con la característica de toxicidad “Continuación”.

1, 2 Dicloroetano	0.5
1, 1 Dicloroetileno	0.7
2, 4 Dinitrotolueno	0.13
2, 4 D	10.0
Endrin	0.02
Heptacloro y su epóxido	0.008
Hexaclorobenceno	0.13
Hexaclorobutadieno	0.5
Hexacloroetano	3.0
Lindano	0.4
Mercurio	0.2
Metiletilcetona	200.0
Metoxicloro	10.0
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	100.0
Piridina	5.0
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0
Tetracloruro de carbono	0.5
Tetracloroetileno	0.7
Toxafeno	0.5
2, 4, 5 TP (Silvex)	1.0
Tricloroetileno	0.5
2, 4, 6 triclorofenol	2.0

Fuente: Dirección Metropolitana de Medio Ambiente, 2005, pp. 4 1- 43.

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Diseño experimental

2.1.1 *Tipo y diseño de investigación*

La investigación correspondiente al diseño e implementación de un sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio en la Facultad de Ciencias - ESPOCH inició siendo explicativa, debido a que se basó en las características del lodo residual generado como subproducto del tratamiento de aguas residuales por una PTAR doméstica, el cual es una temática presente en la cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales en niveles superiores de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias - ESPOCH.

Posteriormente, la investigación se transformó en exploratoria, ya que al contar con la caracterización del lodo residual, se propuso un sistema de tratamiento de lodos residuales novedoso y efectivo, basado en modelos matemáticos que toman en cuenta las características del lodo residual e investigaciones anteriores para brindar una herramienta didáctica a los estudiantes, que les permitan realizar prácticas de laboratorio.

Finalmente, la investigación se convirtió en correlacional, debido a que la intención fue conocer la relación que existe entre las variables independientes (concentración de sólidos suspendidos totales y el porcentaje de humedad) frente a la variable dependiente (tiempo de tratamiento).

2.1.2 *Unidad de análisis*

La unidad de análisis de la investigación corresponde a los estudiantes que cursaron niveles superiores de la Facultad de Ciencias - ESPOCH y recibieron la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, los cuales lograron aprender e interpretar temáticas relacionadas con el tratamiento de lodo residual proveniente de la fosa séptica de una PTAR doméstica, a través de la práctica de un sistema de tratamiento de lodos que se ajuste a características reales.

2.1.3 Población de estudio

La población de estudio de la investigación fueron los estudiantes que cursaron niveles superiores de la Facultad de Ciencias - ESPOCH y recibieron la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales en la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, los cuales no han podido realizar prácticas de laboratorio en temas relacionados con esta materia, ya que no cuentan con equipos de laboratorio dentro de sus instalaciones para poder realizarlas.

2.1.4 Tamaño de muestra

El tamaño de la muestra de la investigación corresponde a los 58 estudiantes que cursaron niveles superiores de la Facultad de Ciencias - ESPOCH y recibieron la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales en la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental.

2.1.5 Selección de muestra

La selección de la muestra de la investigación se basó en la realización de encuestas a todos los estudiantes que cursaron niveles superiores de la Facultad de Ciencias - ESPOCH y recibieron la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales en la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, es decir, 28 personas.

2.2 Metodología

2.2.1 Localización de la experimentación

La experimentación del presente trabajo de titulación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Además, en la fase experimental se realizaron una serie de caracterizaciones de los parámetros de control, identificados en el sistema de tratamiento de lodos residuales, a fin de evaluar su eficiencia en base a la concentración de sólidos suspendidos totales, porcentaje de humedad y reducción de volumen del lodo generado; éstas tuvieron lugar en el Laboratorio Lacquanálisis S.A. del Cantón Ambato.

2.2.2 Justificación de la experimentación

La experimentación se justificó a través de los estudiantes que cursaron niveles superiores de la Facultad de Ciencias - ESPOCH de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, los cuales fueron objeto de una encuesta inicial virtual realizada para identificar las deficiencias y fortalezas que existen en el área práctica de la Cátedra de Tratamiento de Aguas y la aceptación que tendría el diseño e implementación de equipos de laboratorio que permitirán realizar prácticas ajustadas al estado actual y real del tratamiento de aguas residuales en el país.

2.2.3 Lugar del muestreo

El lugar asignado para el muestreo de lodo residual correspondió a la fosa séptica de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), la cual generalmente se encuentra bajo la administración de una Empresa Pública - Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado ubicada en cada ciudad del país (EP - EMAPA).

Para la selección del lugar de muestreo ideal, la PTAR modelo de la investigación debió reunir características que se ajusten a la realidad del medio en que vivimos, es decir, debe ser una estación depuradora de aguas residuales que trate un afluente de tipo doméstico, diseñada para un caudal máximo de 3 L/s a 9 L/s; que combine diferentes etapas de tratamiento entre las cuales generalmente se encuentran aliviadero, canal de rejillas, sedimentador o desarenador, fosas sépticas o tanques Imhoff, filtros biológicos de flujo ascendente o descendente, cámara de cloración y cámaras de evacuación de lodos o eras de secado; y que genere como subproducto principalmente lodo residual estabilizado.

A continuación se evaluaron diferentes PTAR en base a las características anteriormente mencionadas, luego se eligió la PTAR de la cual partió el diseño y construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto, y la PTAR a partir de la cual se realizaron las pruebas experimentales y la implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio.

2.2.4 Caracterización del lodo residual preliminar

El lodo residual generado como subproducto del tratamiento del agua residual perteneciente al sistema de alcantarillado de la Parroquia Pishilata que descarga en la PTAR “Tiugua El Parque”, luego de atravesar las etapas pertenecientes al tratamiento primario y secundario que corresponden al aliviadero, canal de rejillas, sedimentador y fosas sépticas fue caracterizado

bajo parámetros físicos, químicos y microbiológicos, los cuales fueron seleccionados específicamente para el diseño del espesador de lodos por gravedad y las eras de secado.

La caracterización se desarrolló de la siguiente manera:

- Medición del caudal.
- Acondicionamiento de la cámara de secado de lodos.
- Ubicación del punto de descarga.
- Muestreo del lodo residual.
- Análisis de las muestras del lodo residual.

2.2.4.1 Medición del caudal

La medición del caudal consistió en determinar el volumen de lodo residual que sale de la fosa séptica de la PTAR “Tiugua El Parque” por unidad de tiempo utilizando el método de aforo pendiente - diámetro, utilizando una tabla de cálculo facilitada por la empresa EP - EMAPA A.

2.2.4.1.1 Materiales

Los materiales utilizados para medir el caudal fueron los siguientes:

- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Guantes de látex.
- Mandil.
- Tabla de caudal vs. pendiente - diámetro de la PTAR “Tiugua El Parque” EP - EMAPA A.
- Calculadora.

2.2.4.1.2 Procedimiento

El método de aforo pendiente - diámetro fue desarrollado de la siguiente manera:

- Se estableció los puntos de medición de caudal afines a la tabla de caudal vs. pendiente - diámetro de la PTAR “Tiugua El Parque” cuyos datos corresponden únicamente al segmento de monitoreo y punto de muestreo específicos para el aforo.

- Se identificó el material de construcción de la tubería y se midió el diámetro interno de su sección circular.
- Se inició la primera medición de caudal ubicándose en el punto de descarga en la tubería.
- Se tomó el flexómetro y se colocó en el eje central de la tubería para medir la distancia existente entre la superficie del lodo residual y la pared superior de la tubería.
- Se repitió el procedimiento 10 veces durante todo el período de muestreo cada 10 minutos.
- Se restó la distancia medida anteriormente con la distancia correspondiente al diámetro interno de la tubería para obtener el valor del tirante del lodo residual.
- Se verificó los valores obtenidos durante las mediciones del tirante con la tabla de caudal vs. pendiente - diámetro de la PTAR “Tiagua El Parque” para establecer el caudal de salida de la fosa séptica en unidades de m³/s.
- Se calculó el caudal promedio con los valores obtenidos de la tabla.

2.2.4.2 *Acondicionamiento de la cámara de secado de lodos*

El equipo de operación y mantenimiento de las PTAR de EP - EMAPA A procedió a dar mantenimiento a la cámara de secado de lodos, retirando todo tipo de material que puede interferir con la descarga del lodo residual de las fosas sépticas.

2.2.4.3 *Ubicación del punto de descarga*

Se ubicó los puntos de descarga de las fosas sépticas a la cámara de secado de lodos, para proceder a la apertura de las válvulas que regulan el paso de lodo residual; los cuales fueron sujeto de muestreo.

2.2.4.4 *Muestreo del lodo residual preliminar*

La toma de muestra preliminar se basó en un método de muestreo compuesto, ubicando el punto de descarga de la fosa séptica de la PTAR “Tiagua El Parque”, del cual desfogaba el lodo residual contenidas en ella, el cual permitió el mantenimiento de la fosa séptica, de acuerdo al registro de medición de lodos de la fosa séptica proporcionados por EP - EMAPA A.

2.2.4.4.1 *Materiales*

Los materiales utilizados para el muestreo fueron los siguientes:

- Recipiente plástico de 2.5 L.
- Recipiente estéril.
- Balde plástico de 20 L.
- Cooler.
- Gel refrigerante.
- Cuerda.
- Guantes de látex.
- Mandil.
- Marcador indeleble.

2.2.4.4.2 *Procedimiento*

El muestreo compuesto se realizó de la siguiente manera:

- De acuerdo al período de vaciado de 2 horas de las fosas sépticas se estableció los intervalos para el aforo del lodo residual descargado en la cámara de secado de lodos.
- Utilizando un balde plástico de 20 L atado a una cuerda se recolectó el lodo residual de las fosas sépticas.
- Para el análisis físico - químico, se tomó con un recipiente graduado 250 mL de muestra y se reservó en un recipiente de 2.5 L, el cual se almacenó en un cooler a una temperatura de 4 °C.
- Se repitió el procedimiento 10 veces, hasta completar el volumen del recipiente, sin dejar aire dentro y tapándolo herméticamente.
- Inmediatamente tomada la muestra, se secó el recipiente con toallas absorbentes y se identificó con un marcador indeleble escribiendo en él información puntual, como el lugar de muestreo, el proceso del cual se obtiene la muestra, el personal responsable del muestreo y la hora del muestreo.
- El análisis microbiológico se tomó con un recipiente estéril adecuado ubicándolo directamente bajo el punto de muestreo, llenando las $\frac{3}{4}$ partes de su volumen y tapándolo herméticamente; esta toma de muestra se realizó una sola vez al finalizar el período de muestreo.

- Finalmente, se registró datos correspondientes a información del responsable del muestreo, del punto de muestreo, de las características climáticas del muestreo y de los parámetros que permitieron la medición in situ en la hoja correspondiente a la cadena de custodia proporcionada por el Laboratorio de Análisis Lacquanálisis S.A.

Las muestras de lodo residual recolectadas fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Lacquanálisis S.A., en un tiempo de 30 minutos luego de su muestreo, para su análisis.

2.2.4.5 Análisis de las muestras del lodo residual preliminar

Las muestras de lodo residual tomadas en la PTAR “Tiugua El Parque” fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Lacquanálisis S.A., manteniendo una cadena de custodia adecuada, a fin de obtener resultados confiables, los cuales fueron emitidos en el informe de resultados entregados por el laboratorio; es así que, a continuación se detalla el parámetro, la unidad, el límite máximo, el método y la incertidumbre del método para cada parámetro analizado.

Tabla 1-2. Análisis de muestra de lodo residual de la PTAR “Tiugua El Parque”.

ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS				
Parámetro	Unidad	Límite máximo	Método	Incertidumbre del método
pH	UpH	6 - 9	PRO TEC 011/APHA 4500 H+B	± 0.95%
DQO	mg/L	200	HACH 8000/PRO TEC 014	± 14.1%
DBO ₅	mg/L	100	PRO TEC 030/APHA 5220 B	-
Sólidos totales	mg/L	1600	PRO TEC 017/APHA 2540 B	± 2.29%
Sólidos suspendidos	mg/L	130	PRO TEC 021/APHA 2540 D	± 20.26%
Sólidos sedimentables	mg/L	-	PRO TEC 021/APHA 2540 F	± 1%
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS				
Coliformes fecales	NMP/1000 mL	10000	PRO TEC 036/AOAC 991.14	-

Fuente: Lacquanálisis S.A., 2015, p. 1.

2.2.5 Diseño del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

El diseño del sistema de tratamiento de lodos a escala de laboratorio se realizó en función de la caracterización del lodo residual preliminar de la PTAR “Tiugua El Parque” de afluente doméstico, y de los parámetros de diseño que se ajustaron a las ecuaciones de dimensionamiento del sistema de tratamiento de lodos residuales obtenidos de fuentes bibliográficas. Es así que se realizaron cálculos obteniendo valores teóricos, reales y de construcción teniendo cuidado de que el sistema funcione adecuadamente y cumpla con los requerimientos básicos de operación.

2.2.5.1 Procedimiento

El diseño del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio se realizó de la siguiente manera:

- Se revisaron estudios realizados anteriormente sobre el tratamiento de lodos residuales.
- Se eligió un tren de tratamiento compuesto de dos unidades que atendieron los procesos de espesado y desaguado del lodo.
- De acuerdo a la caracterización del lodo residual preliminar de la PTAR “Tiugua El Parque” y a los parámetros de diseño del literal 1.8.1.1. y 1.8.2.1. que se ajustaron a las ecuaciones de dimensionamiento detalladas en el literal 1.8.1.2. y 1.8.2.2. se diseñó el sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto, obteniendo valores teóricos de las unidades que componen el tratamiento.
- Se estableció el factor de escala de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales analizando entre los investigadores y el tutor del trabajo de titulación el espacio físico disponible en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, el caudal de lodo residual a tratar, los costos de construcción, la facilidad de operación y mantenimiento del sistema y la disponibilidad económica de los investigadores.
- Se determinó los valores reales de dimensionamiento multiplicando los valores teóricos con el factor de escala de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales.
- Se convirtió los valores reales a valores de construcción, aproximando los resultados a números enteros.
- Se dibujó los planos del sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto utilizando el espacio de trabajo Dibujo y anotación en AutoCAD empleando los valores de construcción.

2.2.6 Construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

El sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio se realizó a partir de las dimensiones de construcción obtenidas en el diseño del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio; cumpliendo exactamente las especificaciones que presentan los planos de construcción, con la finalidad de asegurar que los equipos construidos tengan exactamente las mismas dimensiones obtenidas en los cálculos. La construcción de los equipos se realizó en dos talleres mecánicos en la ciudad de Ambato.

2.2.6.1 Materiales

El espesador de lodos por gravedad ocupó los siguientes materiales y equipos para su construcción, así:

- Planchas de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor.
- Vidrio templado de 6 líneas de espesor 7×30 cm.
- Tubo cuadrado de acero inoxidable 2 pulgadas.
- Ángulos de acero inoxidable de 90° de 5mm de espesor.
- Garruchas fijas de 160 mm de altura.
- Garruchas móviles de 160 mm de altura.
- Eje de acero inoxidable de 1 1/4 pulgada de diámetro.
- Eje de acero inoxidable de 1/2 pulgada de diámetro.
- Platina de acero inoxidable de 5 mm de espesor.
- Prisionero de acero 3/8.
- Moto reductor mono/trifásico angular 1/4 Hp 18 rpm.
- Pernos de acero inoxidable 1/4.
- Pernos de acero inoxidable 3/8.
- Tornillo de acero inoxidable 1/4.
- Tornillo de acero inoxidable 5/20.
- Electrodo inox.
- Pega de tubo PVC.
- Pega epóxida.
- Silicona.
- Teflón.
- Tubo PVC sanitaria de 2 pulgadas de diámetro.
- Codos de PVC de 90° y 2 pulgadas de diámetro.

- Tee PVC y 2 pulgadas de diámetro.
- Válvula de bola de PVC de 2 pulgadas de diámetro.
- Unión semiroscada de PVC de 2 pulgadas de diámetro.
- Abrazaderas de platino de 2 pulgadas de diámetro.
- Enchufe.
- Cable.

Las eras de secado ocupó los siguientes materiales y equipos para su construcción, así:

- Planchas de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor.
- Vidrio templado de 4 líneas de espesor 26×38 cm.
- Tubo cuadrado de acero inoxidable 0.5 pulgadas.
- Garruchas fijas de 160 mm de altura.
- Garruchas móviles de 160 mm de altura.
- Platina de acero inoxidable de 0.7 mm de espesor.
- Dímero de electricidad de 6001 V.
- Focos de calor 200 W reflector interior blanco.
- Boquilla porcelana rosca.
- Pernos de acero inoxidable 1/4.
- Tornillo de acero inoxidable 1/4.
- Electrodos inox.
- Pega de tubo PVC.
- Pega epóxida.
- Silicona.
- Teflón.
- Tubo PVC sanitaria de 2 pulgadas de diámetro.
- Codos de PVC de 90° y 2 pulgadas de diámetro.
- Válvula de bola de PVC de 2 pulgadas de diámetro.
- Unión semiroscada de PVC de 2 pulgadas de diámetro.
- Abrazaderas de platino de 2 pulgadas de diámetro.
- Enchufe.
- Cable.

Además, la construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto se desarrolló bajo un funcionamiento totalmente hidráulico que involucren todas las fases de operación del

sistema movilizándolo el lodo residual a través del efecto de la presión sin la intervención de ningún equipo mecánico.

Terminada la fase de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales se realizaron pruebas de funcionamiento preliminares en los talleres de construcción verificando el correcto funcionamiento de los equipos y así trasladarlos posteriormente al Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH y realizar las respectivas pruebas experimentales.

2.2.7 Pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

Una vez que el equipo fue instalado en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH se procedió a desarrollar una serie de pruebas experimentales con la finalidad de verificar el grado de efectividad del tratamiento de lodos residuales y así obtener datos que permitan evidenciar el funcionamiento del sistema.

2.2.7.1 Recolección del lodo residual para el tratamiento

La recolección del lodo residual se llevó a cabo en la PTAR “Cunchibamba” perteneciente a la Provincia de Tungurahua, Cantón Ambato, Parroquia Cunchibamba, en donde se tomó un volumen de lodo residual de 60 L de muestra tanto concentrada como diluida, dando un total de 120 L de muestra.

2.2.7.1.1 Materiales

Los materiales utilizados para recolección del lodo residual fueron los siguientes:

- Bidón plástico de 60 L con cincho.
- Balde plástico de 20 L.
- Cuerda.
- Guantes de látex.
- Mandil.
- Marcador indeleble.

2.2.7.1.2 *Procedimiento*

La recolección del lodo residual se realizó de la siguiente manera:

- De acuerdo a la altura de lodo residual contenido en la fosa séptica, la cual oscilaba entre 1 y 0.70 m, valor alcanzado en un período de 6 meses; se estableció la fecha indicada para la recolección de lodo residual descargado a la cámara de secado de lodos.
- Utilizando un balde plástico de 20 L atado a una cuerda se recolectó el lodo residual de la fosa séptica, el cual se vertió en un bidón plástico de 60 L.
- Este proceso se realizó hasta completar un volumen de 60 L.
- Se tapó herméticamente el bidón plástico de 60 L con ayuda del cincho.

2.2.7.2 *Caracterización del lodo residual inicial del sistema de tratamiento de lodos residuales*

La caracterización se desarrolló de la siguiente manera:

- Muestreo del lodo residual inicial.
- Análisis de las muestras del lodo residual inicial.

2.2.7.2.1 *Muestreo del lodo residual inicial*

El muestreo del lodo residual inicial se realizó una vez que la muestra fue depositada en el espesador de lodos por gravedad antes de encender el equipo y verificando que la muestra se encuentre homogeneizada.

2.2.7.2.1.1 *Materiales*

Los materiales utilizados para el muestreo fueron los siguientes:

- Recipiente plástico de 2 L.
- Balde plástico de 5 L.
- Guantes de látex.
- Cooler.
- Gel refrigerante.
- Mandil.

- Marcador indeleble.

2.2.7.2.1.2 Procedimiento

El procedimiento fue desarrollado de la siguiente manera:

- Para el tiempo correspondiente a 0 horas se verificó que las válvulas 1, 2 y 3 del espesador de lodos por gravedad se encuentren cerradas y el moto reductor se encuentre apagado.
- A continuación se encendió el moto reductor por un período de 15 minutos para homogeneizar el lodo residual.
- Se abrió la válvula 2 del espesador de lodos por gravedad.
- Utilizando un balde plástico de 5 L se recolectó el lodo residual del espesador de lodos por gravedad y se cerró la válvula 2 nuevamente.
- Para el análisis físico se vertió la muestra recolectada en el recipiente plástico de 2 L, el cual se almacenó en un cooler a una temperatura de 4 °C.

2.2.7.2.2 Análisis de las muestras del lodo residual inicial.

Las muestras de lodo residual inicial tomadas en el espesador de lodos por gravedad fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Lacquanálisis S.A., manteniendo una cadena de custodia adecuada, cuyo parámetro analizado fue la concentración de sólidos suspendidos totales.

Tabla 2-2. Análisis de muestra de lodo residual inicial del sistema de tratamiento de lodos residual.

ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS				
Parámetro	Unidad	Límite máximo	Método	Incertidumbre del método
Sólidos suspendidos	mg/L	130	PRO TEC 021/APHA 2540 D	± 20.26%

Fuente: Lacquanálisis S.A., 2015, p.1.

2.2.7.3 Tratamiento en el espesador de lodos por gravedad

Una vez que la muestra de lodo residual de 60 L fue depositada en el espesador de lodos por gravedad y luego de realizar la caracterización inicial de la misma, el proceso de estabilización inició.

2.2.7.3.1 *Equipo*

El equipo utilizado para el tratamiento fue el siguiente:

- Espesador de lodos por gravedad.

2.2.7.3.2 *Procedimiento*

El tratamiento de lodos en el espesador de lodos por gravedad fue realizado de la siguiente manera:

- Se encendió el moto reductor del espesador de lodos por gravedad por un período de 12 horas.
- Se apagó el moto reductor y se dejó reposar la muestra de lodo residual por un período de 1 hora.

2.2.7.4 *Ensayos de espesamiento*

Los ensayos de espesamiento fueron realizados en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

2.2.7.4.1 *Ensayos de sedimentación en cochada*

El ensayo de sedimentación en cochada determinó la máxima concentración de sólidos en una columna de 0.40 m de altura en un período de 60 minutos.

2.2.7.4.1.1 *Materiales*

Los materiales utilizados en este método fueron los siguientes:

- Probeta de 1000 mL.
- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Guantes de látex.
- Mandil.
- Marcador de tinta indeleble.

- Libreta de anotación.

2.2.7.4.1.2 Procedimiento

El procedimiento para el ensayo de sedimentación en cochada se desarrolló de la siguiente manera:

- Se graduó una probeta de 1000 mL con espacios de 0.10 m de distancia entre sí hasta completar una altura de 0.40 m, utilizando un flexómetro y un marcador de tinta indeleble.
- Se vertió una muestra de lodo residual en una probeta de 1000 mL hasta completar una altura de 0.40 m.
- Se realizó mediciones de altura de la fase sólida de la muestra cada 10 minutos durante una hora, registrando los datos en una tabla, señalando el tiempo y la altura de la fase sólida.
- Se graficó una curva con los puntos obtenidos ubicando el tiempo en el eje de las X y la altura de los sólidos en el eje de las Y.
- Se trazó dos rectas tangentes en función de los extremos de la curva obtenida.
- Se halló el punto de cruce entre las tangentes, trazando una recta perpendicular hasta cortar la línea curva, obteniendo así la concentración crítica.
- Se trazó una recta horizontal hasta intersectar la línea tangente correspondiente al extremo máximo de la curva.
- Finalmente, se intersectó el punto de encuentro con una recta vertical identificando la altura de la concentración deseada y el tiempo para alcanzar dicha concentración respectivamente.

2.2.7.4.2 Ensayos de sedimentación en espesador de lodos por gravedad

El ensayo de sedimentación en el espesador de lodos por gravedad fue una técnica desarrollada a partir del ensayo de sedimentación en cochada, simulando a escala de laboratorio el asentamiento de sólidos en el espesador de lodos por gravedad de 140 L de capacidad durante un período de 12 horas.

2.2.7.4.2.1 Materiales

Los materiales utilizados en este método fueron los siguientes:

- Cronómetro.
- Guantes de látex.

- Mandil.
- Marcador de tinta indeleble.
- Libreta de anotación.

2.2.7.4.2.2 *Equipos*

El equipo utilizado en este método fue el siguiente:

- Espesador de lodos por gravedad.

2.2.7.4.2.3 *Procedimiento*

El procedimiento para el ensayo de sedimentación en el espesador de lodos por gravedad se desarrolló de la siguiente manera:

- Se vertió una muestra de lodo residual en el espesador de lodos por gravedad de 140 L de capacidad máxima hasta completar un volumen de 60 L.
- Se midió la altura de la fase sólida de la muestra cada hora durante un período total de 12 horas, dejando reposar la muestra al menos 15 minutos, es decir, que el moto reductor se encendió 1 hora y se apagó 15 minutos para permitir la sedimentación de las partículas sólidas.
- Se registró los datos en una tabla señalando el tiempo y el volumen de la fase sólida.
- Se graficó una curva con los puntos obtenidos ubicando el tiempo en el eje de las X y el volumen de los sólidos en el eje de las Y y se trazó dos rectas tangentes en función de los extremos de la curva obtenida.
- Se halló el punto de cruce entre las tangentes y se trazó una recta perpendicular hasta cortar la línea curva para obtener así la concentración crítica.
- Se trazó una recta horizontal hasta intersectar la línea tangente correspondiente al extremo máximo de la curva.
- Finalmente, se intersectó el punto de encuentro con una recta vertical identificando el volumen de la concentración deseada y el tiempo para alcanzar dicha concentración, respectivamente.

2.2.7.5 Caracterización del lodo residual intermedia del sistema de tratamiento de lodos residuales

La caracterización del lodo residual intermedia fue realizada para un período transcurrido de 12 horas de funcionamiento del espesador de lodos por gravedad, a fin de obtener la muestra intermedia del lodo residual, tomando en cuenta que se dejó reposar el contenido del espesador de lodos por gravedad, 1 hora, apagando el moto reductor. La caracterización se desarrolló de la siguiente manera:

- Muestreo del lodo residual intermedio.
- Análisis de las muestras del lodo residual intermedio.

2.2.7.5.1 Muestreo del lodo residual intermedio.

El muestreo del lodo residual intermedio fue realizado del mismo modo que se detalló en el literal 3.2.6.2.1, utilizando los mismos materiales y aplicando el mismo procedimiento.

2.2.7.5.2 Análisis de las muestras del lodo residual intermedio

Las muestras de lodo residual intermedias tomadas en el espesador de lodos por gravedad fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Lacquanálisis S.A., manteniendo una cadena de custodia adecuada, cuyos parámetros analizados fueron la concentración de sólidos suspendidos totales y el porcentaje de humedad.

Tabla 3-2. Análisis de muestra de lodo residual intermedio del sistema de tratamiento de lodos residuales.

ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS				
Parámetro	Unidad	Límite máximo	Método	Incertidumbre del método
Sólidos suspendidos	mg/L	130	PRO TEC 021/APHA 2540 D	± 20.26%
Porcentaje de humedad	%	-	-	-

Fuente: Lacquanálisis S.A., 2015, p.1.

2.2.7.6 Tratamiento en las eras de secado

Una vez que la muestra de lodo residual haya permanecido un período de 12 horas en el espesador de lodos por gravedad y luego de realizar la caracterización intermedia de la misma, el proceso de desaguado inició.

2.2.7.6.1 *Equipo*

El equipo utilizado para el tratamiento fue el siguiente:

- Eras de secado.

2.2.7.6.2 *Procedimiento*

El tratamiento de lodos en las eras de secado fue realizado de la siguiente manera:

- Se vertió la muestra de lodo residual contenida en el espesador de lodos por gravedad en las eras de secado ocupando una altura de 0.02 m en toda la superficie del equipo.
- Se colocó los focos de calor y se encendió el dímero a su máxima potencia por un período de 72 horas.
- Se apagó los focos de calor y se verificó el volumen de lodo seco y agua eliminada en el equipo.

2.2.7.7 *Ensayos en las eras de secado*

Los ensayos de desaguado fueron realizados en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

2.2.7.7.1 *Ensayo de desaguado en eras de secado*

El ensayo de desaguado en eras de secado fue una técnica desarrollada para este sistema de tratamiento de lodos, simulando a escala de laboratorio la eliminación del agua contenida en el lodo residual húmedo de 0.02 m de altura durante un período de 72 horas.

2.2.7.7.1.1 *Materiales*

Los materiales utilizados en este ensayo fueron los siguientes:

- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Guantes de látex.
- Mandil.

- Marcador de tinta indeleble.
- Libreta de anotación.

2.2.7.7.1.2 *Equipo*

El equipo utilizado en este ensayo fue el siguiente:

- Eras de secado.

2.2.7.7.1.3 *Procedimiento*

El procedimiento para el ensayo de desaguado en las eras de secado se desarrolló de la siguiente manera:

- Se vertió el contenido de la zona de lodos o lodo húmedo del espesador de lodos por gravedad en las eras de secado alcanzando 0.02 m de altura máxima, procurando que el contenido mencionado este distribuido homogéneamente y ocupe toda el área de las eras de secado.
- Se midió la altura del lodo húmedo cada 6 horas durante un periodo de 72 horas en total.
- Se calculó el volumen de lodo seco en las eras de secado geoméricamente en función de la longitud y amplitud del equipo.
- Se registró los datos en una tabla señalando el tiempo y la altura del lodo húmedo.
- Se graficó una curva con los puntos obtenidos ubicando el tiempo en el eje de las X y la altura de lodo húmedo en el eje de las Y.
- Se calculó la velocidad de desaguado de lodos restando la altura del lodo húmedo de la altura del lodo seco y dividiendo para el periodo de desaguado.
- Finalmente, se calculó el volumen de agua eliminada en el equipo restando el volumen de lodo húmedo del volumen de lodo seco.

2.2.7.8 *Caracterización del lodo residual final del sistema de tratamiento de lodos residuales*

La caracterización del lodo residual final fue realizada luego de un periodo correspondiente a 84 horas de funcionamiento del sistema de tratamiento de lodos, a fin de obtener la muestra final de lodo residual.

La caracterización se desarrolló de la siguiente manera:

- Muestreo del lodo residual final.
- Análisis de las muestras del lodo residual final.

2.2.7.8.1 Muestreo del lodo residual final

El muestreo de lodo residual final se realizó transcurrido las 84 horas de tratamiento que incluyeron las 12 horas en el espesador de lodos por gravedad y las 72 horas en las eras de secado.

2.2.7.8.1.1 Materiales

Los materiales utilizados para el muestreo fueron los siguientes:

- Recipiente plástico de 2 L.
- Funda ziploc de 1 Kg.
- Balde plástico de 5 L.
- Espátula.
- Guantes de látex.
- Cooler.
- Gel refrigerante.
- Mandil.
- Marcador indeleble.

2.2.7.8.1.2 Procedimiento

El procedimiento fue ejecutado de la siguiente manera:

- La recolección de la muestra final de lodo residual correspondiente a 84 horas se realizó mediante un muestreo por cuarteo, en el cual cada unidad de las eras de secado que contenían la capa sólida fue dividida en 4 subunidades equidistantes.
- De estas divisiones con ayuda de la espátula se recolectó una cantidad de capa sólida de 2 subunidades opuestas en dirección, de las 4 subunidades divididas en cada unidad de las eras de secado, al fin de alcanzar una masa 2 Kg.

- La cantidad de lodo recolectado fue homogeneizado y cuarteado nuevamente hasta que se obtuvo una muestra de 1 Kg.
- Se reservó la muestra de 1 Kg en una funda ziploc, se etiquetó y se reservó en un cooler a 4 °C para su análisis físico.
- El muestreo del agua eliminada fue realizado del mismo modo que se detalló en el literal 3.2.6.2.1, utilizando los mismos materiales y aplicando el mismo procedimiento.

2.2.7.8.2 *Análisis de las muestras del lodo residual final*

Las muestras de lodo residual finales tomadas en las eras de secado fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Lacquanálisis S.A., manteniendo una cadena de custodia adecuada, cuyos parámetros analizados fueron la concentración de sólidos suspendidos totales para el agua eliminada y el porcentaje de humedad para el lodo seco.

Tabla 4-2. Análisis de muestra de lodo residual final del sistema de tratamiento de lodos residuales.

ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS				
Parámetro	Unidad	Límite máximo	Método	Incertidumbre del método
Sólidos suspendidos	mg/L	130	PRO TEC 021/APHA 2540 D	± 20.26%
Porcentaje de humedad	%	-	-	-

Fuente: Lacquanálisis S.A., 2015, p.1.

Las pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio fueron ejecutadas tanto para muestra concentrada como para diluida.

2.2.8 *Implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio*

La implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio se realizó a través de dos prácticas de laboratorio detalladas en las hojas técnicas correspondientes a la Guía de Prácticas de Laboratorio realizadas con los estudiantes de noveno semestre de la cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales de la Carrera de Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH en el Laboratorio de Aire que en conjunto correspondieron a la localización de la experimentación.

2.2.8.1 Procedimiento

El procedimiento fue ejecutado de la siguiente manera:

- Luego de evaluar las encuestas iniciales informativas digitales a los estudiantes con preguntas vinculadas al conocimiento y aceptación de los equipos propuestos en esta investigación antes de realizar las prácticas de laboratorio se definió con el docente de los estudiantes de noveno semestre de la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales de la Carrera de Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH la fecha para la ejecución de las prácticas de laboratorio y su tiempo de ejecución.
- Se generaron hojas técnicas que detallan la ejecución de dos prácticas de laboratorio concernientes al ensayo de sedimentación y espesamiento y al ensayo de desaguado, presentes en la Guía de Prácticas de Laboratorio, las cuales fueron proporcionadas a los estudiantes con anterioridad a la ejecución de las prácticas de laboratorio.
- Se efectuaron las prácticas de laboratorio con los estudiantes en el Laboratorio de Aire de Facultad de Ciencias de la ESPOCH.
- Se ejecutaron encuestas finales informativas digitales a los estudiantes que realizaron las prácticas de laboratorio con preguntas vinculadas a su realización y a posibles mejoras en el sistema después de realizar las prácticas de laboratorio.

2.2.9 Validación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

La validación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio se realizó en base a los resultados obtenidos en las encuestas efectuadas al finalizar la implementación del sistema con los estudiantes de noveno semestre de la cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales II de la Carrera de Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

2.2.9.1 Procedimiento

El procedimiento fue ejecutado de la siguiente manera:

- Se desarrolló una Guía de Prácticas de Laboratorio que contenían las técnicas para la realización de los ensayo de sedimentación y desaguado de lodos.
- Se realizaron el procedimiento 2.2.8.1 perteneciente a la implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio.

- Se evaluaron los resultados de las encuestas finales informativas digitales realizadas a los estudiantes con preguntas vinculadas a la práctica realizada y a posibles mejoras en el sistema después de realizar las prácticas de laboratorio.
- Se validaron las hojas técnicas generadas que detallan la ejecución de dos prácticas de laboratorio concernientes al ensayo de sedimentación y espesamiento y al ensayo de desaguado.
- Se elaboraron o corrigieron documentos definitivos que ayuden a la realización de prácticas de laboratorio y a la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio.

CAPÍTULO III

3 ANÁLISIS DE DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Análisis y discusión de resultados

3.1.1 Localización de la experimentación

La localización de la experimentación del presente trabajo de titulación perteneció a las instalaciones del Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicado en las coordenadas 17M 758247.00 m Este 9816895.00 m Sur 2821 msnm, pertenecientes a la Provincia de Chimborazo, Cantón Riobamba, Parroquia Lizarzaburu, en dónde se ubicó el sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto.

3.1.2 Justificación de la experimentación

El resultado de la encuesta inicial a los estudiantes que cursaron niveles superiores de la Facultad de Ciencias - ESPOCH de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental específicamente a los estudiantes de octavo y noveno nivel dieron a conocer las deficiencias y fortalezas que existe en el área práctica de la materia y la aceptación que tendría el diseño e implementación de equipos de laboratorio en la localización de la experimentación como indican las siguientes figuras.

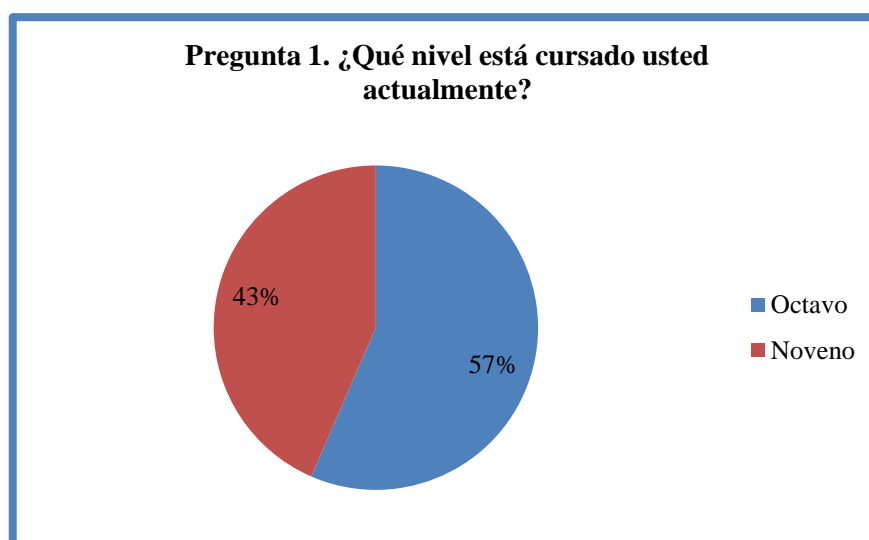


Figura 1-3. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 1-3. muestra la pregunta 1 de la encuesta inicial, en la cual se representa el nivel que cursaban los 92 estudiantes de la Facultad de Ciencias - ESPOCH de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, de los cuales el 57% se encontraba cursando octavo nivel mientras el 43% cursaba noveno nivel, lo cual permitió establecer que los estudiantes estaban tratando temas relacionados con la cátedra de Tratamiento de Aguas I y II respectivamente por tal razón conocían la necesidad de la implementación de equipos de laboratorio para la realización de prácticas de laboratorio que eleven su nivel académico.

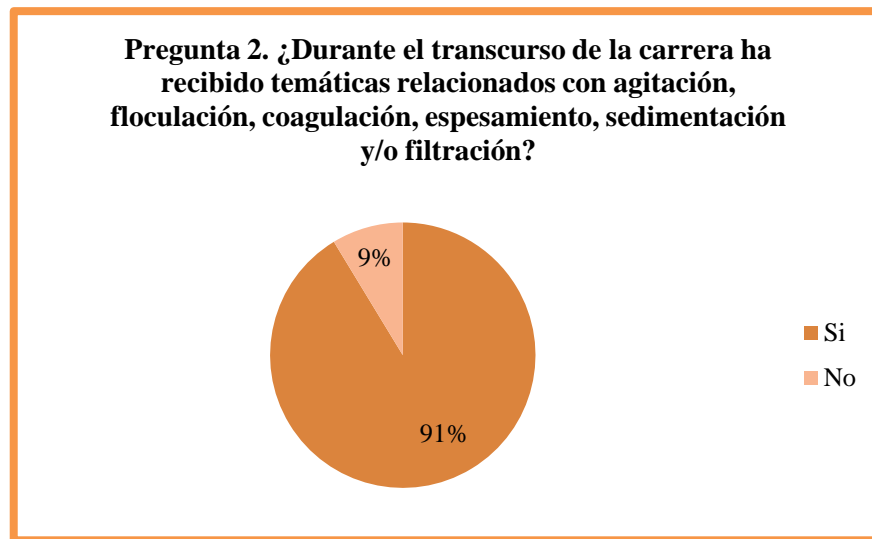


Figura 2-3. Resultados de la pregunta 2 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 2-3. representa la pregunta 2 de la encuesta inicial, en la cual se determinaron los temas recibidos por los estudiantes relacionados con la Cátedra de Tratamiento de Aguas I y II en donde, el 91% afirmó haber recibido temas relacionados con la agitación, floculación, coagulación, espesamiento, sedimentación, y filtración; de los cuales la agitación, espesamiento, sedimentación y filtración fueron los procesos enfocados potencialmente en el sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio, desarrollado en esta investigación.

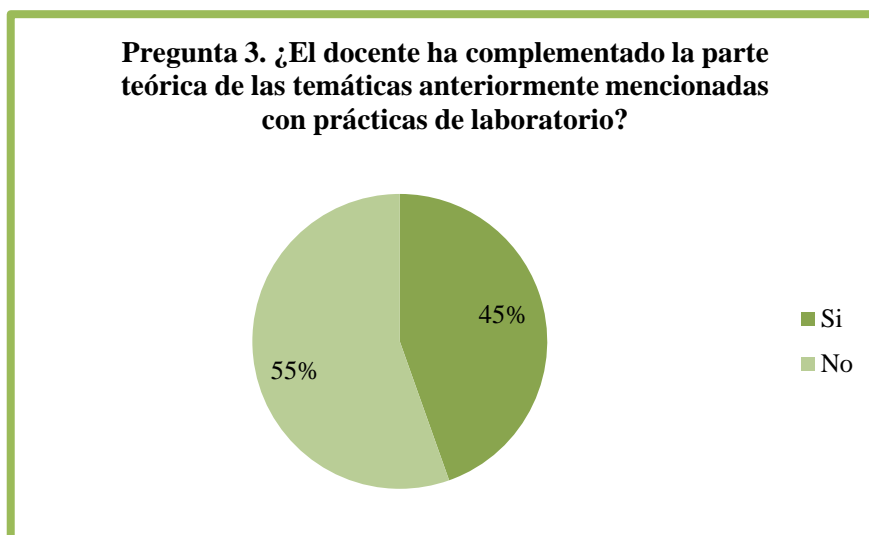


Figura 3-3. Resultados de la pregunta 3 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 3-3. representa la pregunta 3 de la encuesta inicial, la cual permitió conocer si el docente ha complementado la parte teórica de las temáticas citadas en la pregunta 2 de la encuesta inicial con prácticas de laboratorio y el 55% respondió que no, mientras el 45% respondió que sí, lo cual indicó que más de la mitad no había realizado prácticas de laboratorio con respecto a estas temáticas restando la competitividad académica de los estudiantes.

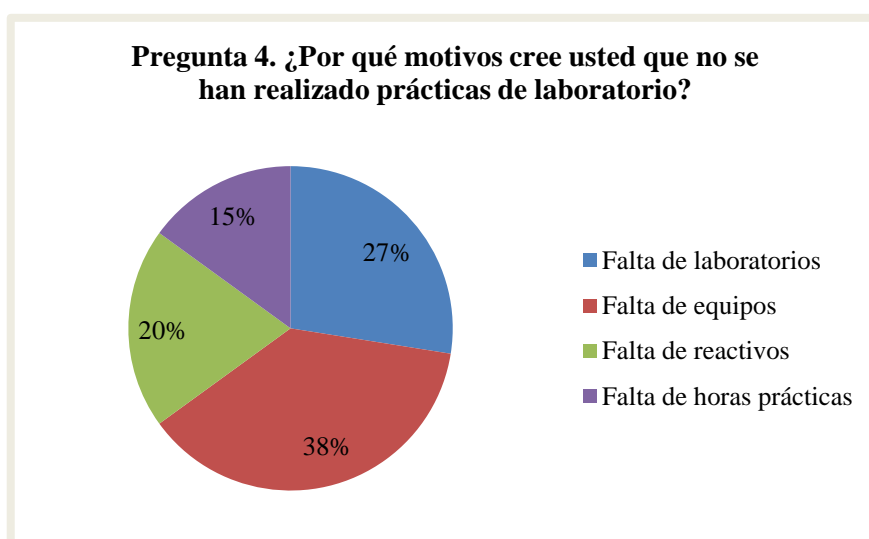


Figura 4-3. Resultados de la pregunta 4 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Los motivos que los estudiantes consideraron como razón por la cual no se han realizado prácticas de laboratorio según la pregunta 4 de la encuesta inicial revelan en la Figura 4-3. que en su mayoría con un 38% fue debido a falta de equipos de laboratorio, seguido de falta de

laboratorios con un 27%, la falta de reactivos con un 20% y finalmente la falta de horas practicas con un 15%; estos resultados por tanto confirmaron que la implementación de equipos de laboratorio contribuirán enormemente a solventar el problema que representa la ausencia de prácticas de laboratorio elevando la calidad académica de los estudiantes.

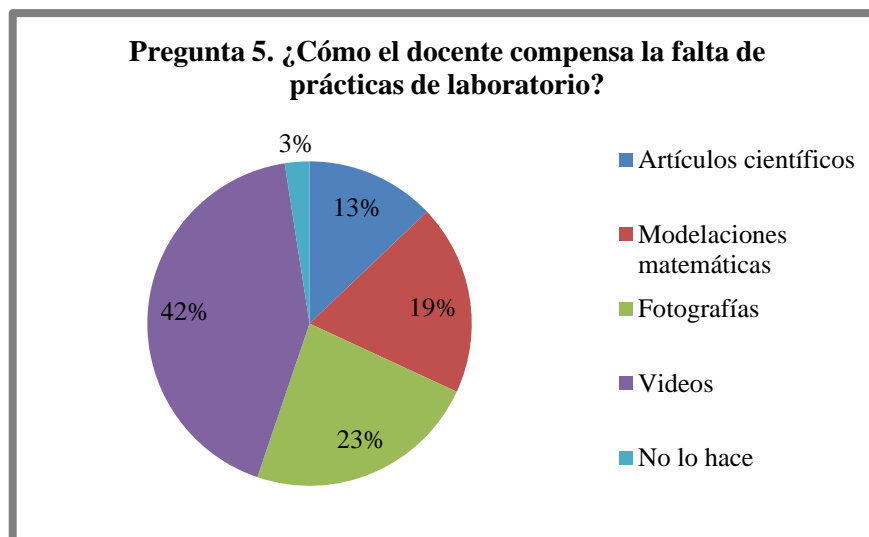


Figura 5-3. Resultados de la pregunta 5 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 5-3. representa la pregunta 5 de la encuesta inicial, la cual nos permitió conocer cuáles fueron las formas más comunes que los docentes utilizaban para solventar la falta de prácticas de laboratorio revelando así que, el material audio visual es decir los videos y fotografías con un 42% y un 23% respectivamente son la forma más común en que se han solventado la falta de prácticas de laboratorio, ya que al visualizar y escuchar cómo se suscitan las temáticas de la pregunta 2 de la encuesta inicial de forma práctica se puede comprender de mejor manera la parte teórica, así también en un 19% los docentes han revisado con los estudiante artículos científicos y en un 13% han realizado modelaciones matemáticas que en realidad podrían complementar las prácticas de laboratorio, finalmente un 3% manifestó que los docentes no han compensado de ninguna manera la falta de prácticas de laboratorio, porcentaje que una vez que se haya implementado los equipos de laboratorio propuestos en esta investigación se anulará.

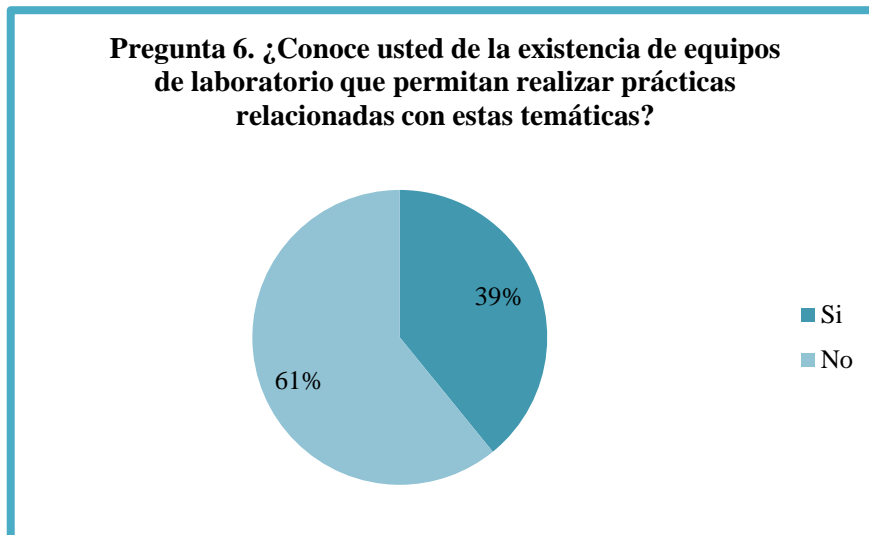


Figura 6-3. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Se evidenció a través de la pregunta 6 de la encuesta inicial en la Figura 6-3. que en un 61% los estudiantes tenían conocimiento de equipos de laboratorio que les permitan realizar prácticas de laboratorio relacionadas con las temáticas de la pregunta 2 de la encuesta inicial y un 39% de los estudiantes no tenían el conocimiento de la existencia de estos equipos.

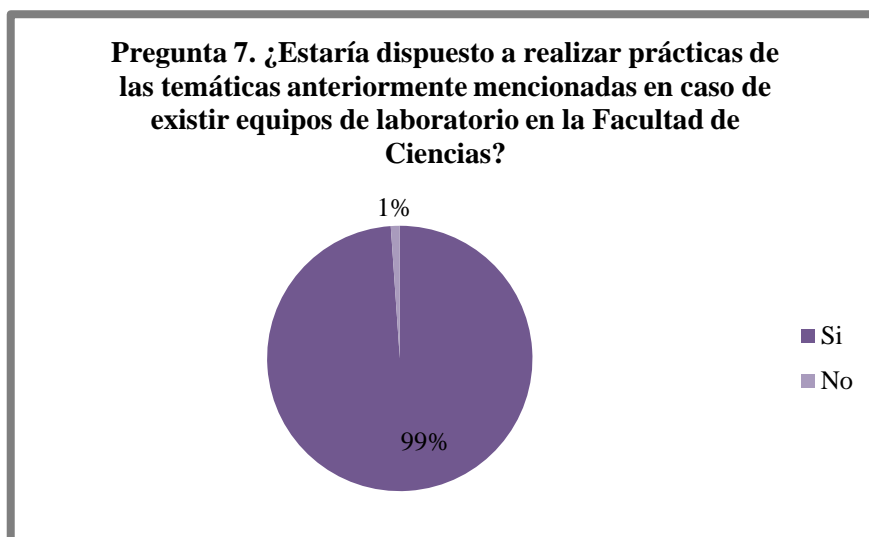


Figura 7-3. Resultados de la pregunta 7 de la encuesta inicial.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Finalmente, según la pregunta 7 de la encuesta inicial en la Figura 7-3. se evidencia que un 99% de los estudiantes estarían dispuestos a realizar prácticas de laboratorio acerca de la temáticas citadas en el pregunta 2 de la encuesta inicial en el caso de existir equipos de

laboratorio como el que se ha propuesto en esta investigación; así también, sólo un 1% de los estudiantes manifestó que no estarían dispuestos a realizar prácticas de laboratorio.

En general esto representó que la implementación del sistema de tratamiento de lodos a escala de laboratorio propuesto en esta investigación tendría una gran aceptación de los estudiantes, representaría una herramienta para los docentes y elevaría el nivel académico de la Facultad de Ciencias - ESPOCH, ya que el sistema propuesto en esta investigación han logrado reunir las características adecuadas que exigen los estudiantes al proporcionarles una herramienta útil para resolver problemas en su vida profesional.

3.1.3 Lugar del muestreo

Los resultados concernientes al lugar asignado para el muestreo de lodo residual correspondió a la fosa séptica de las PTAR ubicadas en el Cantón Ambato que se encontraban bajo la administración de la Empresa Pública - Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP - EMAPA A) evaluándolas en base a las características anteriormente mencionadas en el literal 2.2.1. Es así como de las 12 PTAR funcionales administradas por EP - EMAPA A que se evaluaron conjuntamente con el Jefe y Contramaestre de Operación y Mantenimiento de las PTAR de Ambato de EP - EMAPA A; se preseleccionaron tres PTAR sujetas de prueba, tomando en cuenta el cronograma de mantenimiento de las fosas sépticas que mantenía la empresa.

Las PTAR que fueron preseleccionadas fueron la PTAR “Tiugua El Parque”, la PTAR “Cunchibamba” y PTAR “El Peral”, las cuales reunían las siguientes características.

La PTAR “Tiugua El Parque” está ubicada en las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) 17 M 769710.99 m Este 9860629.97 m Sur 2556 m.s.n.m., las cuales pertenecen a la Provincia de Tungurahua, Cantón Ambato, Parroquia Pishilata. Esta es una estación depuradora de aguas residuales domésticas, diseñada para un caudal máximo de 3 L/s, ésta combina diferentes etapas de tratamiento, entre las cuales tenemos un aliviadero, un canal de rejillas, un sedimentador, dos fosas sépticas, dos filtros biológicos de flujo ascendente que utilizan lechuguín y una cámara de cloración; en lo que respecta al tratamiento del agua. Mientras que para el tratamiento de los subproductos que son los lodos residuales generados de manera específica en las estructuras del sedimentador y fosa séptica tenemos dos cámaras de secado de lodos; en donde ambos tratamientos funcionan adecuadamente.



Ilustración 1-1. Ubicación PTAR “Tiugua El Parque”.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La PTAR “Cunchibamba” está ubicada en las coordenadas 17M 769874.09 m Este 9873602.35 m Sur 2598 msnm, las cuales pertenecen a la Provincia de Tungurahua, Cantón Ambato, Parroquia Cunchibamba. Ésta es una estación depuradora de aguas residuales domésticas, diseñada para un caudal máximo de 9 L/s, que compone diferentes etapas de tratamiento, entre ellas un aliviadero, un canal de rejillas, dos sedimentadores, dos fosas sépticas, dos filtros biológicos de flujo ascendente que utilizan lechuguín y una cámara de cloración; para el tratamiento del agua y para el tratamiento de los subproductos que son los lodos residuales generados de manera específica en las estructuras del sedimentador y fosa séptica tenemos dos cámaras de secado de lodos; en donde ambos tratamientos funcionan adecuadamente.



Ilustración 2-1. Ubicación PTAR “Cunchibamba”.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La PTAR “El Peral” está ubicada en las coordenadas 17M 763354.00 m Este 9862553.33 m Sur 2537 msnm, las cuales pertenecen a la Provincia de Tungurahua, Cantón Ambato, Parroquia

Atocha - Ficoa. Es una estación depuradora de aguas residuales domésticas, diseñada para un caudal máximo de 2 L/s, y está compuesta de varias etapas de tratamiento, entre ellas un aliviadero, un canal de rejillas, un sedimentador, un desarenador, dos fosas sépticas, dos filtros biológicos de flujo ascendente que utilizan lechuguín y una cámara de cloración; para el tratamiento del agua y para el tratamiento de los subproductos que son los lodos residuales generados de manera específica en las estructuras del sedimentador y fosa séptica tenemos dos cámaras de secado de lodos. La PTAR no trabaja eficientemente, ya que el caudal de diseño era menor al caudal de operación.

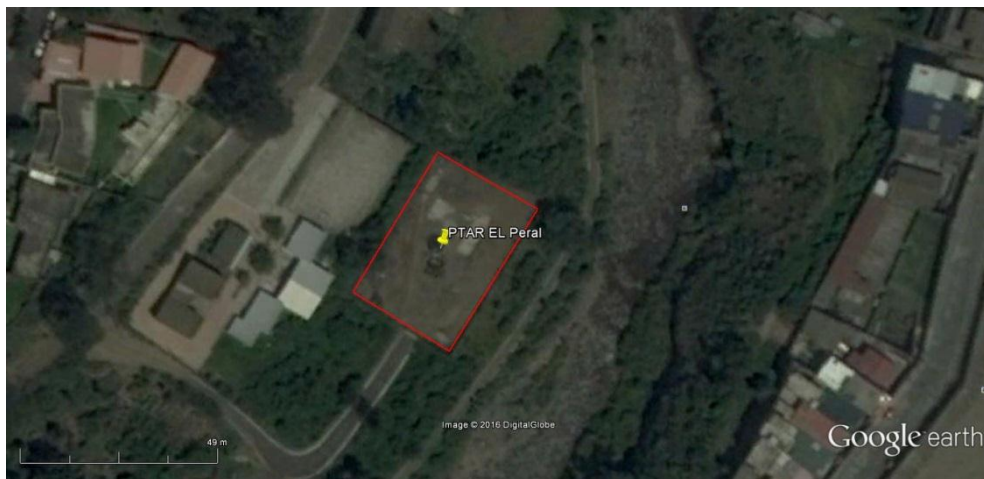


Ilustración 3-1. Ubicación PTAR “El Peral”.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Llegando así a la conclusión de elegir a la PTAR “Tiugua El Parque” para el muestreo de lodo residual, cuyos datos permitieron el diseño y construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto, y a la PTAR “Cunchibamba” para realizar las pruebas experimentales y la implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio. Tomando en cuenta que la PTAR “Tiugua El Parque” estaba lista en ese momento para el mantenimiento de la fosa séptica, y que la PTAR “Cunchibamba” al tener dimensiones mayores el mantenimiento de la fosa séptica fue realizado luego de un tiempo de tres meses, el cual coincidió con la ejecución de las pruebas experimentales y la implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio.

3.1.4 Caracterización del lodo residual preliminar

Tabla 1-3. Datos obtenidos de la caracterización del lodo residual preliminar de la PTAR "Tiugua El Parque".

ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICOS		
Parámetro	Unidad	Valor
pH	UpH	7.01
DQO	mg/L	23037
DBO ₅	mg/L	14974
Sólidos totales	mg/L	90596
Sólidos suspendidos	mg/L	1868
Sólidos sedimentables	mg/L	70
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO		
Coliformes fecales	NMP/1000 mL	18x10 ⁶

Fuente: Lacquanálisis S.A., 2015, p. 1.

Como resultado de la caracterización del lodo preliminar se obtuvo la Tabla 1-3., en donde se detallan los resultados de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos; sin embargo, el parámetro de interés para el desarrollo de esta investigación se basó únicamente en la concentración de sólidos suspendidos totales cuyo valor fue 1868 mg/L, el mismo que se utilizó para el dimensionamiento de los equipos que componen el sistema de tratamiento de lodos residuales propuesto en este trabajo.

3.1.4.1 Medición del caudal

Tabla 2-3. Datos obtenidos en la medición del caudal de la PTAR "Tiugua El Parque".

Tiempo (min)	Diámetro interno de la tubería (m)	Tirante sin agua (m)	Tirante con agua (m)	Caudal (m ³ /s)
0	0.1016	0.0670	0.0350	0.0109
10	0.1016	0.0680	0.0340	0.0103
20	0.1016	0.0690	0.0330	0.0097
30	0.1016	0.0710	0.0310	0.0086
40	0.1016	0.0720	0.0300	0.0081
50	0.1016	0.0710	0.0310	0.0086
60	0.1016	0.070	0.0320	0.0091
70	0.1016	0.0680	0.0340	0.0103

Tabla 2-3. Datos obtenidos en la medición del caudal de la PTAR “Tiugua El Parque” “Continuación”.

80	0.1016	0.0690	0.0330	0.0097
90	0.1016	0.0700	0.0320	0.0091
Promedio				0.0094

Fuente: EP-EMAPA-A, 2015, p. 1.

El caudal de diseño medido en la fosa séptica de la PTAR “Tiugua El Parque” correspondió a un valor de 0.0094 m³/s, el cual representó el caudal de ingreso a la fosa séptica después de atravesar un tratamiento primario compuesto por aliviadero, rejillas y sedimentador; obtenido a través del empleo de la tabla de caudal vs. pendiente - diámetro de la PTAR “Tiugua El Parque” facilitado por la empresa EP - EMAPA A. La medición de caudal reproducida en la Tabla 2-3. permitió definir las dimensiones del sistema de tratamiento de lodos residuales basadas en las condiciones reales que presenta una PTAR doméstica de operación continua, siendo esta adaptada a unidades de operación discontinua, es decir m³/batch.

3.1.5 Diseño del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

En lo que respecta al diseño del tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio se determinó que el tren de tratamiento del sistema estaría compuesto por un espesador de lodos por gravedad (ELG) como unidad de estabilización y sedimentación del lodo residual y por unas eras de secado (EDS) como unidad como unidad de desaguado y deshidratación del lodo residual; interconectados por un sistema de tuberías que trabaja hidráulicamente.

Por tanto se realizaron los cálculos para el diseño del espesador de lodos por gravedad y las eras de secado según las ecuaciones establecidas en los literales 1.8.1.2. y 1.8.2.2. y los parámetros de diseño establecidos en los literales 1.8.1.1. y 1.8.2.1., respectivamente.

3.1.5.1 Diseño del espesador de lodos por gravedad

El diseño del espesador de lodos por gravedad fue desarrollado al efectuar los siguientes cálculos:

- Cálculo del Área superficial del ELG (A_{sI}):

Para calcular el área superficial del espesador de lodos por gravedad se aplicó la Ec. 1-1:

Datos:

$$Q_d = 0.0094 \text{ m}^3/\text{s} = 813.888 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$SS = 1868.000 \text{ mg/L} = 1.868 \text{ kg/m}^3$$

Obtenidos a partir de la caracterización preliminar detallada en el literal 3.1.3 en la Tabla 1-3. y literal 3.1.3.1 en la Tabla 2-3.

Parámetros de diseño:

$$C_{ss1} = 60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

Empleando este valor detallado en la Tabla 3-1. Así tenemos:

$$A_{s1} = \frac{Q_d \times SS}{C_{ss1}}$$
$$A_s = \frac{813.888 \text{ m}^3/\text{d} \times 1.868 \text{ kg/m}^3}{60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}}$$
$$A_{s1} = 25.339 \text{ m}^2$$

- Cálculo del diámetro del cilindro (D):

La dimensión del diámetro del espesador por gravedad se obtuvo aplicando la Ec. 2-1:

Datos:

$$A_{s1} = 25.339 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A_{s1}}{\pi}}$$
$$D = \sqrt{\frac{4 \times 25.339 \text{ m}^2}{\pi}}$$
$$D = 5.680 \text{ m}$$

- Cálculo del volumen del cilindro (V):

El volumen del espesador por gravedad se calculó aplicando la Ec. 3-1:

Datos:

$$Q_d = 0.0094 \text{ m}^3/\text{s} = 813.888 \text{ m}^3/\text{d}$$

Parámetros de diseño:

$$t_{rh1} = 2 \text{ h} = 0.083 \text{ d}$$

Utilizando este valor detallado en la Tabla 3-1.

Así tenemos:

$$\begin{aligned} V &= Q_d \times t_{rh1} \\ V &= 813.888 \text{ m}^3/\text{d} \times 0.083 \text{ d} \\ V &= 67.824 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- Cálculo de la altura del cilindro (H_1):

Se calculó geoméricamente mediante la Ec. 4-1:

Datos:

$$V = 67.824 \text{ m}^3$$

$$A_{s1} = 25.339 \text{ m}^2$$

Así tenemos:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{V}{A_{s1}} \\ H_1 &= \frac{67.824 \text{ m}^3}{25.339 \text{ m}^2} \\ H_1 &= 2.677 \text{ m} \end{aligned}$$

- Cálculo de la altura del cono (H_2):

La altura del cono del espesador por gravedad se determinó geoméricamente aplicando la Ec. 5-1:

Datos:

$$D = 5.680 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$\alpha = 30^\circ$$

Aplicando este valor según la Tabla 3-1.

Así tenemos:

$$H_2 = \tan \alpha \times \frac{D}{2}$$
$$H_2 = \tan 30^\circ \times \frac{5.680 \text{ m}}{2}$$
$$H_2 = 1.640 \text{ m}$$

- Cálculo de la altura de la fosa de lodos (H_3):

La altura de la fosa de lodos se determinó geoméricamente mediante la Ec. 6-1:

Datos:

$$H_1 = 2.677 \text{ m}$$

$$H_2 = 1.640 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$H_{s1} = 0.5 \text{ m}$$

$$R_{F/E} = 30\%$$

De acuerdo a los valores según la Tabla 3-1.

Así tenemos:

$$H_3 = (H_1 + H_2 + H_{s1}) \times R_{F/E}$$
$$H_3 = (2.677 \text{ m} + 1.640 \text{ m} + 0.5 \text{ m}) \times 0.30$$
$$H_3 = 1.445 \text{ m}$$

- Cálculo de la altura total del ELG (H_t):

La altura total del espesador de lodos por gravedad se obtuvo aplicando la Ec. 7-1:

Datos:

$$H_1 = 2.677 \text{ m}$$

$$H_2 = 1.640 \text{ m}$$

$$H_3 = 1.445 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$H_{s1} = 0.5 \text{ m}$$

Valor empleado según la Tabla 3-1.

Así tenemos:

$$\begin{aligned} H_t &= (H_1 + H_2 + H_3 + H_{s1}) \\ H_t &= (2.677 \text{ m} + 1.640 \text{ m} + 1.445 \text{ m} + 0.5 \text{ m}) \\ H_t &= 6.262 \text{ m} \end{aligned}$$

- Cálculo del diámetro de la fosa de lodos (D_f):

El diámetro de la fosa de lodos se calculó en función de la Ec. 8-1:

Datos:

$$D = 5.680 \text{ m}$$

Así tenemos:

$$\begin{aligned} D_{fl} &= 0.20 \times D \\ D_{fl} &= 0.20 \times 5.680 \text{ m} \\ D_{fl} &= 1.136 \text{ m} \end{aligned}$$

- Cálculo del radio del cono (g):

El radio del cono se obtuvo geoméricamente a partir de la Ec. 9-1:

Datos:

$$D = 5.680 \text{ m}$$

$$H_2 = 1.640 \text{ m}$$

Así tenemos:

$$g = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \times (H_2)^2}$$
$$g = \sqrt{\left(\frac{5.680 \text{ m}}{2}\right)^2 \times (1.640 \text{ m})^2}$$
$$g = 3.279 \text{ m}$$

- Cálculo del área del cono (A_c):

El área del cono se determinó geoméricamente aplicando la Ec. 10-1:

Datos:

$$D = 5.680 \text{ m}$$

$$g = 3.279 \text{ m}$$

Así tenemos:

$$A_c = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right) \times g$$
$$A_c = \pi \times \left(\frac{5.680 \text{ m}}{2}\right) \times 3.279 \text{ m}$$
$$A_c = 29.259 \text{ m}$$

- Cálculo de la longitud de rasqueta unitaria (L_{RU}):

La longitud de la rasqueta unitaria se determinó tomando en cuenta la Ec. 11-1:

Datos:

$$H_t = 6.261 \text{ m}$$

Así tenemos:

$$L_{RU} = 0.1 \times H_t$$
$$L_{RU} = 0.1 \times 6.261 \text{ m}$$
$$L_{RU} = 0.626 \text{ m}$$

- Cálculo de la longitud de rasqueta total (L_{RT}):

La longitud de la rasqueta total se calculó a partir de la Ec. 12-1:

Datos:

$$L_{RU} = 0.626 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$N_{\mathcal{Q}R} = 2 \text{ u}$$

Aplicando este valor en función de la Tabla 3-1.

Así tenemos:

$$\begin{aligned} L_{RT} &= L_{RU} \times N_{\mathcal{Q}R} \\ L_{RT} &= 0.626 \text{ m} \times 2 \\ L_{RT} &= 1.252 \text{ m} \end{aligned}$$

- Cálculo de la base de rasqueta unitaria (B_{RU}):

La base de la rasqueta total se calculó geoméricamente aplicando la Ec. 13-1:

Datos:

$$A_c = 29.259 \text{ m}^2$$

$$L_{RT} = 1.252 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$R_{RC} = 10 \% = 0.1$$

Empleando este valor detallado en la Tabla 3-1.

Así tenemos:

$$B_{Ru} = \frac{R_{R/C} \times A_c}{L_{RT}}$$

$$B_{Ru} = \frac{0.1 \times 29.259 \text{ m}^2}{1.252 \text{ m}}$$

$$B_{Ru} = 2.337 \text{ m}$$

Los cálculos realizados anteriormente dieron como resultado los valores teóricos de las dimensiones del espesador de lodos por gravedad.

El diseño del espesador de lodos por gravedad se realizó en 3 momentos representados en la Tabla 3-3. que corresponden a los valores teóricos, reales y de construcción, es decir, a dimensiones del 100%, 11% y corregidos a los requerimientos del taller de construcción, respectivamente. La escala de construcción del 11% aplicado al espesador de lodos por gravedad consideró la caracterización preliminar del lodo residual, el ajuste de los parámetros de diseño, la disponibilidad del espacio físico, la solvencia económica de los investigadores y el aporte académico a los estudiantes de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

Tabla 3-3. Resultados del diseño del espesador de lodos por gravedad.

Parámetro	Unidad	Valor teórico	Valor real	Valor de construcción
Área superficial del ELG	m ²	25.339	2.787	-
Diámetro del cilindro	m	5.680	0.625	0.610
Volumen del cilindro	m ³	67.824	0.109	-
Altura de cilindro	m	2.677	0.294	0.300
Altura del cono	m	1.640	0.180	0.150
Altura de fosa de lodos	m	1.445	0.159	0.150
Altura total del ELG	m	6.262	0.689	0.650
Altura de seguridad	m	0.500	0.050	0.100
Diámetro de fosa de lodos	m	1.136	0.125	0.150
Radio del cono	m	3.279	0.361	0.340
Área del cono	m ²	29.259	3.218	-
Longitud de rasqueta unitaria	m	0.626	0.069	0.040
Longitud de rasqueta total	m	1.252	0.138	0.080
Base de rasqueta unitaria	m	2.337	0.257	0.330

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

3.1.5.2 Diseño de las eras de secado

El diseño de las eras de secado fue desarrollado al efectuar los siguientes cálculos:

- Cálculo de la carga de sólidos de las EDS (C_{ss2}):

La carga de sólidos de las eras de secado se obtuvo mediante la Ec. 14-1:

Datos:

$$Q_d = 0.0094 \text{ m}^3/\text{s} = 813.888 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$SS = 1868.000 \text{ mg/L} = 1.868 \text{ kg/m}^3$$

Obtenidos a partir de la caracterización preliminar detallada en el literal 3.1.3 en la Tabla 11-3. y literal 3.1.3.1 en la Tabla 12-3.

Así tenemos:

$$C_{ss2} = Q_d \times SS$$
$$C_{ss2} = 813.888 \text{ m}^3/\text{d} \times 1.868 \text{ kg/m}^3$$
$$C_{ss2} = 1520.343 \text{ kg/d}$$

- Cálculo del flujo másico de sólidos de lodos (M_s):

El flujo másico de sólidos de lodos se obtuvo a partir de la Ec. 15-1:

Datos:

$$C_{ss2} = 1520.343 \text{ kg/d}$$

Así tenemos:

$$M_s = 0.325 \times C_{ss2}$$
$$M_s = 0.325 \times 1520.343 \text{ kg/d}$$
$$M_s = 494.111 \text{ kg/d}$$

- Cálculo del flujo volumétrico de lodo digerido (V_{ld}):

El flujo volumétrico de lodo digerido se calculó mediante la Ec. 16-1:

Datos:

$$M_s = 494.111 \text{ kg/d}$$

Parámetros de diseño:

$$\rho_l = 1.040 \text{ kg/L} = 1040.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\%_s = 8 \% = 0.08$$

Manejando estos valores detallados en la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$V_{ld} = \frac{M_s}{\rho_l \times \%_s}$$
$$V_{ld} = \frac{494.111 \text{ kg/d}}{1040.000 \text{ kg/m}^3 \times 0.08}$$
$$V_{ld} = 5.939 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Cálculo del volumen de lodo a extraer (V_{le}):

El volumen de lodo a extraer se determinó empleando la Ec. 17-1:

Datos:

$$V_{ld} = 5.939 \text{ m}^3/\text{d}$$

Parámetros de diseño:

$$t_{rh2} = 7 \text{ d}$$

Utilizando este valor detallado en la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$V_{le} = V_{ld} \times t_{rh2}$$
$$V_{le} = 5.939 \text{ m}^3/\text{d} \times 7 \text{ d}$$
$$V_{le} = 41.572 \text{ m}^3$$

- Cálculo del volumen de lodo extraído (V_{lex}):

El volumen de lodo a extraer se obtuvo mediante la Ec. 18-1:

Datos:

$$V_{le} = 41.572 \text{ m}^3/d$$

Parámetros de diseño:

$$\%_{el} = 40 \% = 0.4$$

Empleando este valor detallado en la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$\begin{aligned} V_{lex} &= V_{le} \times \%_{el} \\ V_{lex} &= 41.572 \text{ m}^3 \times 0.4 \\ V_{lex} &= 16.629 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- Cálculo del área superficial de las EDS (A_{s2}):

El área superficial de las eras de secado se obtuvo a partir de la Ec. 19-1:

Datos:

$$V_{lex} = 16.629 \text{ m}^3$$

Parámetros de diseño:

$$h_1 = 0.15 \text{ m}$$

Usando este valor de la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$\begin{aligned} A_{s2} &= \frac{V_{lex}}{H_1} \\ A_{s2} &= \frac{16.629 \text{ m}^3}{0.15 \text{ m}} \\ A_{s2} &= 110.858 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Cálculo de la longitud de era total (L):

La longitud de era total se calculó geoméricamente a partir de la Ec. 20-1:

Datos:

$$A_{s2} = 29.259 \text{ m}^2$$

Parámetros de diseño:

$$B = 7.500 \text{ m}$$

Aplicando este valor según la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$L = \frac{A_{s2}}{B}$$
$$L = \frac{29.259 \text{ m}^2}{7.500 \text{ m}}$$
$$L = 14.781 \text{ m}$$

- Cálculo de la longitud de era unitaria (L_u):

La longitud de era unitaria se calculó geoméricamente mediante la Ec. 21-1:

Datos:

$$L = 14.781 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$N_e = 2 \text{ u}$$

Este valor empleándolo según la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$L_u = \frac{L}{N_e}$$
$$L_u = \frac{14.781 \text{ m}}{2}$$
$$L_u = 7.391 \text{ m}$$

- Cálculo del ancho de era unitaria (A_u):

El ancho de era unitaria se calculó geoméricamente empleando la Ec. 22-1:

Datos:

$$B = 7.500 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$N_e = 2 \text{ u}$$

Empleando este valor detallado en la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$B_u = \frac{B}{N_e}$$
$$B_u = \frac{7.5000 \text{ m}}{2}$$
$$B_u = 3.750 \text{ m}$$

- Cálculo de la altura de inclinación en longitud (h_2):

La altura de inclinación en longitud se determinó geoméricamente en función de la Ec. 23-1:

Datos:

$$L_u = 7.391 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$\theta_L = 4.297^\circ$$

Manejando este valor detallado en la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$h_2 = \tan \theta_L \times L_u$$
$$h_2 = \tan 4.297^\circ \times 7.391 \text{ m}$$
$$h_2 = 0.555 \text{ m}$$

- Cálculo de la altura de inclinación en amplitud (h_7):

La altura de inclinación en longitud se determinó geoméricamente en base a la Ec. 24-1:

Datos:

$$B_u = 3.750 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$\theta_A = 8.594^\circ$$

Operando este valor establecido en la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$\begin{aligned} h_7 &= \tan \theta_A \times B_u \\ h_7 &= \tan 8.594^\circ \times 3.750 \text{ m} \\ h_7 &= 0.567 \text{ m} \end{aligned}$$

- Cálculo de la altura total de las EDS (h_t):

La altura total de las eras de secado se obtuvo a partir de la Ec. 25-1:

Datos:

$$h_2 = 0.555 \text{ m}$$

$$h_7 = 0.567 \text{ m}$$

Parámetros de diseño:

$$h_1 = 0.150 \text{ m}$$

$$h_3 = 0.150 \text{ m}$$

$$h_4 = 0.150 \text{ m}$$

$$h_5 = 0.150 \text{ m}$$

$$h_6 = 0.150 \text{ m}$$

$$h_{s2} = 0.150 \text{ m}$$

De acuerdo a los valores según la Tabla 4-1.

Así tenemos:

$$h_t = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_{s2})$$

$$h_t = (0.150 \text{ m} + 0.555 \text{ m} + 0.150 \text{ m} + 0.150 \text{ m} + 0.150 \text{ m} + 0.150 \text{ m} + 0.567 \text{ m} + 0.150 \text{ m})$$

$$h_t = 2.022 \text{ m}$$

Los cálculos realizados anteriormente dieron como resultado los valores teóricos de las dimensiones de las eras de secado.

Tabla 4-3. Resultados del diseño de las eras de secado.

Parámetro	Unidad	Valor teórico	Valor real	Valor de construcción
Carga de sólidos de las EDS	Kg/d	1520.343	167.238	-
Flujo másico de sólidos de lodos	Kg/d	494.111	54.352	-
Flujo volumétrico de lodo digerido	m ³ /d	5.939	0.654	-
Volumen de lodo a extraer	m ³	41.572	4.573	-
Volumen de lodo extraído	m ³	16.629	1.829	-
Área superficial de las EDS	m ²	110.858	12.194	-
Longitud de era total	m	14.781	1.626	1.300
Longitud de era unitaria	m	7.391	0.813	0.610
Ancho de era total	m	7.500	0.826	0.800
Ancho de era unitaria	m	3.750	0.413	0.400
Altura de inclinación en longitud	m	0.555	0.061	0.060
Altura de inclinación en amplitud	m	0.567	0.062	0.060
Altura de arena	m	0.150	0.020	0.050
Altura de grava fina	m	0.150	0.020	0.050
Altura de grava gruesa	m	0.150	0.020	0.050
Altura de piedra	m	0.150	0.020	0.050
Altura de lodo	m	0.150	0.020	0.020
Altura de seguridad	m	0.150	0.020	0.180
Altura total de las EDS	m	2.022	0.222	0.650

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

El diseño de las eras de secado se efectuó considerando el mismo criterio y explicación descritos en el literal 3.1.5.1 y cuyos resultados se representan en la Tabla 4-3.

3.1.6 Construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

El espesador de lodos por gravedad y las eras de secado se construyeron con materiales altamente resistentes a la corrosión, entre ellos tenemos acero inoxidable, vidrio templado y tubería sanitaria de PVC, los cuales brindan seguridad y eficiencia durante la operación del mismo. La construcción de los equipos se realizó en dos talleres mecánicos ubicados en la ciudad de Ambato, así el espesador de lodos por gravedad se construyó en el taller mecánico MOLBAC, mientras el eras de secado se construyó en el taller mecánico HEPCO; en donde se siguieron al pie de la letra los valores detallados en los planos de construcción establecidos en el diseño de los equipos.

3.1.6.1 Costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

Tabla 5-3. Costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio.

CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR					
Nº	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
1	pH	1	-	6.72	6.72
2	Coliformes fecales	1	-	19.04	19.04
3	Sólidos suspendidos totales	1	-	11.20	11.20
4	Sólidos sedimentables	1	-	11.20	11.20
5	DBO ₅	1	-	16.80	16.80
6	DQO	1	-	16.80	16.80
7	Sólidos totales	1	-	11.20	11.20
SUBTOTAL					92.96
CONSTRUCCIÓN DEL ESPESADOR DE LODOS POR GRAVEDAD					
Nº	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
8	Planchas de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor	1	u	60.00	60.00
9	Vidrio templado de 6 líneas de espesor 7×30 cm	1	u	1.00	1.00
10	Tubo cuadrado de acero inoxidable 2 pulgadas	1	u	66.70	66.70
11	Ángulos de acero inoxidable de 90° de 5 mm de espesor	0.25	u	48.60	12.15
12	Garruchas fijas de 160 mm de altura	2	u	6.80	13.60
13	Garruchas móviles de 160 mm de altura	2	u	7.00	14.00
14	Eje de acero inoxidable de 1 1/4 pulgada de diámetro	1	m	15.84	16.74
15	Eje de acero inoxidable de 1/2 pulgada de diámetro	2.5	m	10.70	26.76
16	Platina de acero inoxidable de 5 mm de espesor	2	u	29.02	58.02

Tabla 5-3. Costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio “Continuación”.

17	Prisionero de acero 3/8	2	u	0.35	0.70
18	Moto reductor mono/trifásico angular 1/4 Hp 18 rpm	1	u	480.00	480.00
19	Pernos de acero inoxidable 1/4	8	u	0.25	2.00
20	Pernos de acero inoxidable 3/8	4	u	0.40	1.60
21	Tornillo de acero inoxidable 1/4	8	u	0.30	2.40
22	Tornillo de acero inoxidable 5/20	4	u	0.40	1.60
23	Electrodos inox	24	u	0.40	9.60
24	Pega de tubo PVC	1	u	3.50	3.50
25	Pega epóxida	1	u	5.50	5.50
26	Silicona	1	u	4.00	4.00
27	Teflón	1	u	1.25	1.25
28	Tubo PVC sanitaria de 2 pulgadas de diámetro	1	u	2.00	2.00
29	Codos de PVC de 90° y 2 pulgadas de diámetro	2	u	0.60	1.20
30	Tee PVC y 2 pulgadas de diámetro	2	u	0.90	1.80
31	Válvula de bola de PVC de 2 pulgadas de diámetro	3	u	6.00	18.00
32	Unión semiroscada de PVC de 2 pulgadas de diámetro	4	u	1.00	4.00
33	Abrazaderas de platino de 2 pulgadas de diámetro	2	u	0.75	1.50
34	Enchufe	1	u	0.50	0.50
35	Cable	2	u	1.30	2.60
36	Mano de obra HEPCO	-	-	-	250.00
SUBTOTAL					1062.72
CONSTRUCCIÓN DE LAS ERAS DE SECADO					
Nº	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
37	Planchas de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor	1	u	60.00	60.00
38	Vidrio templado de 4 líneas de espesor 26x38 cm	2	u	4.50	9.00
39	Tubo cuadrado de acero inoxidable 0.5 pulgadas	0.25	u	22.40	5.60
41	Garruchas fijas de 160 mm de altura	2	u	6.80	13.60
42	Garruchas móviles de 160 mm de altura	2	u	7.00	14.00
43	Platina de acero inoxidable de 0.7 mm de espesor	1	u	6.16	6.16
45	Dímero de electricidad de 600 watts	1	u	6.50	6.50
46	Focos de calor 200 W reflector interior blanco	2	u	19.50	39.00
47	Boquilla porcelana rosca	1	u	0.52	0.52
48	Pernos de acero inoxidable 1/4	4	u	0.25	1.00
50	Tornillo de acero inoxidable 1/4	4	u	0.30	1.20
52	Electrodos inox	17	u	0.40	6.80
53	Pega de tubo PVC	1	u	3.50	3.50
54	Pega epóxida	1	u	5.50	5.50
55	Silicona	1	u	4.00	4.00
56	Teflón	1	u	1.25	1.25

Tabla 5-3. Costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio “Continuación”.

57	Tubo PVC sanitaria de 2 pulgadas de diámetro	1	u	2.00	2.00
58	Codos de PVC de 90° y 2 pulgadas de diámetro	2	u	0.60	1.20
60	Válvula de bola de PVC de 2 pulgadas de diámetro	2	u	6.00	12.00
61	Unión semiroscada de PVC de 2 pulgadas de diámetro	4	u	1.00	4.00
62	Abrazaderas de platino de 2 pulgadas de diámetro	2	u	0.75	1.50
63	Enchufe	1	u	0.50	0.50
64	Cable	2	m	1.30	2.60
65	Mano de obra MOLBAC	-	-	-	200.00
SUBTOTAL					401.43
CARACTERIZACION INICIAL, INTERMEDIA Y FINAL					
Nº	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
66	Sólidos suspendidos totales	8	-	11.20	89.60
67	Porcentaje de humedad	4	-	8.96	35.84
SUBTOTAL					125.44
TOTAL					1682.55

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 5-3. indica el costo de construcción del sistema de tratamiento de lodos residuales incluido el I.V.A. del 12%, considerando desde la caracterización preliminar ya que esta permitió el diseño del sistema, la construcción del ELG y las EDS como tal; y la caracterización inicial, intermedia y final que fue considerada por la importancia que revela sus datos para verificar que el sistema funcione adecuadamente descartando así la posibilidad de realizar correcciones, confirmando así que la construcción del sistema fue realizada siguiendo la especificación detalladas en su diseño.

3.1.7 Pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

3.1.7.1 Ensayos de espesamiento

3.1.7.1.1 Ensayos de sedimentación para lodo concentrado

Tabla 6-3. Altura en función del tiempo del ensayo de sedimentación en conchada para lodo concentrado.

Tiempo (min)	Altura (m)
0	0.400
10	0.396
20	0.394
30	0.393
40	0.392
50	0.392
60	0.392

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

El resultado de los ensayos de sedimentación en conchada como muestra la Tabla 6-3. permitió determinar claramente que durante el periodo de tiempo que duró el ensayo correspondiente a 60 minutos, la altura del sólidos en la columna no representó una distancia considerable, evidenciando que el lodo se encontraba sumamente concentrado; ya que la altura inicial del lodo fue 0.400 m y la altura final fue 0.392, por ende su diferencia fue 0.008 m.

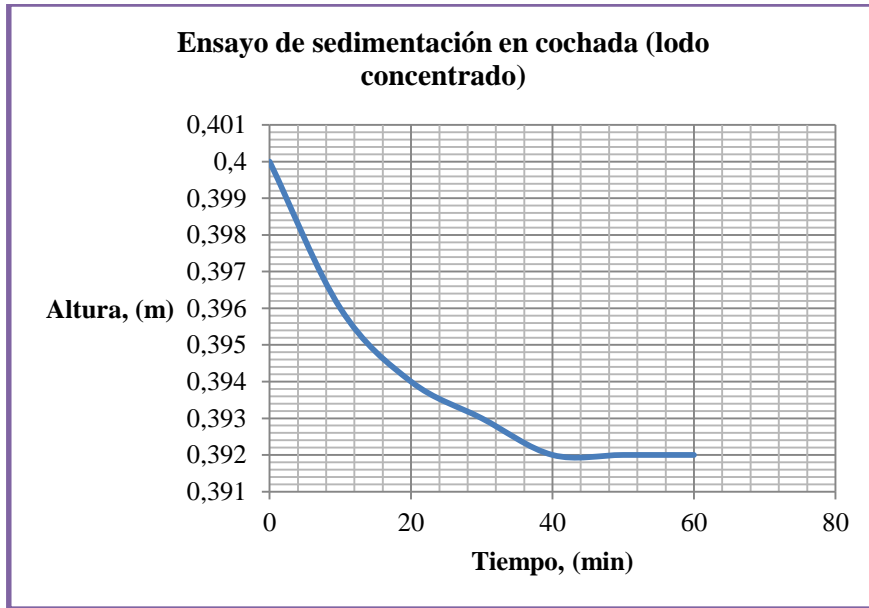


Figura 8-3. Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado representada en la Figura 8-3. simbolizó los valores de tiempo y altura sin corrección.

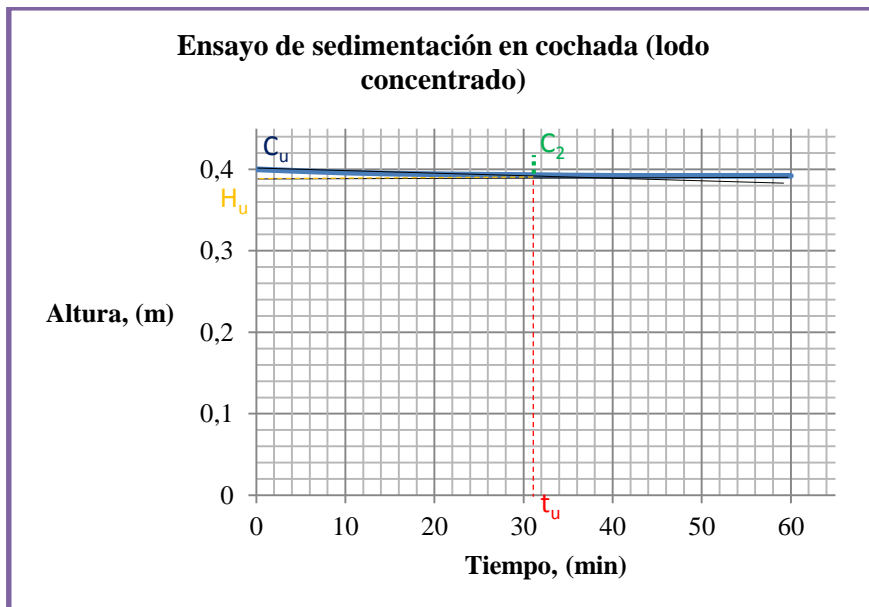


Figura 9-3. Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 9-3. muestra la curva de asentamiento corregida para el ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado, en donde los intervalos del eje Y fueron modificados para

visualizar la curva real que representó el ensayo y así obtener los criterio de forma correcta de acuerdo al procedimiento explicado en el literal 3.2.6.4.1.2.

Tabla 7-3. Resultados del ensayo de sedimentación en cochada para lodo concentrado.

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración crítica (C_2)	3920	mg/L
Concentración deseada (C_u)	4000	mg/L
Altura de la concentración deseada (H_u)	0.390	m
Tiempo para alcanzar la concentración deseada (t_u)	32	min
Velocidad para alcanzar la concentración deseada (v_u)	0.0122	m/min

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Los resultados producto de la interpretación de la Figura 2-3., representados en la Tabla 7-3. para el ensayo de lodo concentrado permitieron determinar que la muestra tenía una concentración crítica de 3920 mg/L alcanzada en un tiempo de 32 min a una velocidad de 0.0122 m/min. Estos datos fueron los que permitieron verificar que la muestra se encontraba altamente concentrada, permitiendo concebir la idea de que el efecto del tratamiento del espesador de lodos no sería significativamente efectivo.

Tabla 8-3. Volumen en función del tiempo del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.

Tiempo (h)	Volumen (L)
0	60
2	58
4	57
6	56
8	56
10	56
12	56

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 8-3. representa el tiempo y volumen del ensayo de sedimentación en el espesador de lodos por gravedad para muestra de lodo concentrado, criterio verificado con el ensayo de sedimentación en cochada realizado previamente. Esta tabla se realizó tomando datos de tiempo y volumen de muestra de lodo concentrado cada hora durante 12 horas, evidenciando un volumen inicial de 60 L y un volumen final de 56 L.

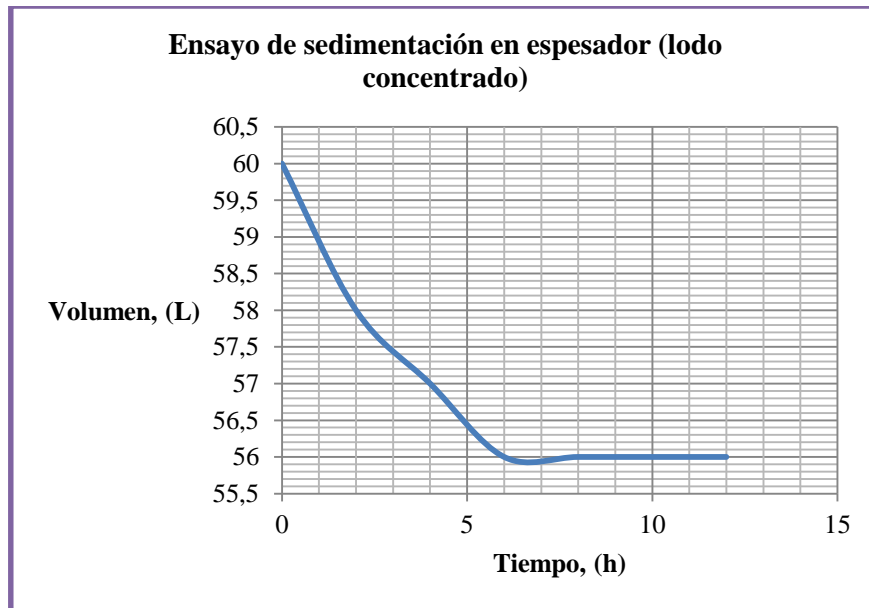


Figura 10-3. Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 10-3. permite visualizar la curva de asentamiento no corregida para el ensayo de sedimentación.

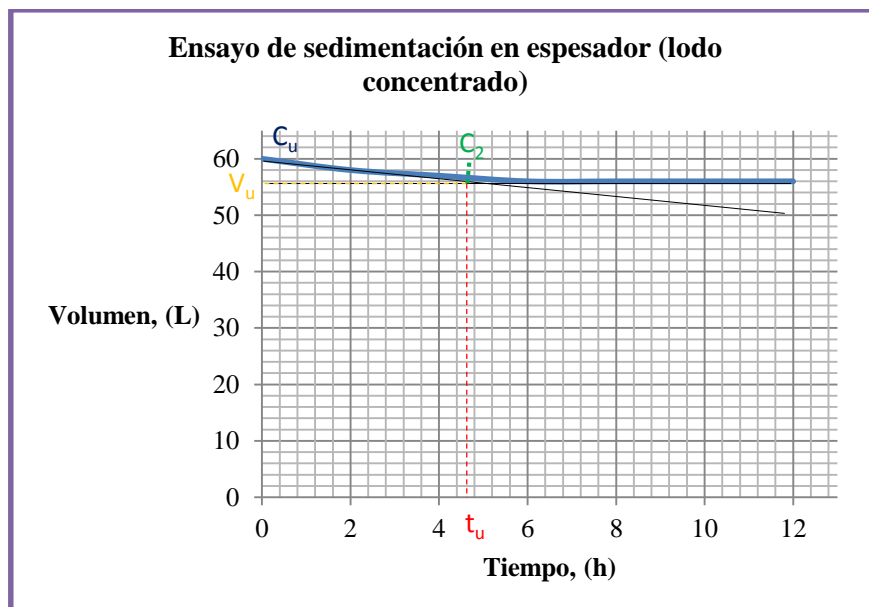


Figura 11-3. Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

En la Figura 11-3. se muestra la curva de asentamiento corregida para el ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado, que en función del procedimiento descrito

en el literal 3.2.6.4.2.3 se obtuvieron los valores de los criterios para analizar el comportamiento de una muestra de lodo concentrado.

Tabla 9-3. Resultados del ensayo de sedimentación en espesador para lodo concentrado.

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración crítica (C_2)	93.330	% v/v
Concentración deseada (C_u)	100	% v/v
Volumen de la concentración deseada (V_u)	56	L
Tiempo para alcanzar la concentración deseada (t_u)	4.700	h
Caudal para alcanzar la concentración deseada (Q_u)	11.915	L/h

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 9-3. indica que la muestra de lodo concentrado que entró en el espesador de lodos por gravedad con un volumen de 60 L y una concentración inicial de 100 %v/v, después de que atravesó el tratamiento y luego de transcurrir un periodo de tiempo de 4.700 h la muestra alcanzó una concentración crítica de 93.330 %v/v con caudal de sedimentación de 11.915 L/h, lo cual representó que el efecto del espesado de lodos por gravedad tuvo sobre una muestra concentrada fue mínimo y constituyó un gasto innecesario de recursos.

3.1.7.1.2 Ensayos de sedimentación para lodo diluido

Tabla 10-3. Altura en función del tiempo del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.

Tiempo (min)	Altura (m)
0	0.400
10	0.338
20	0.278
30	0.242
40	0.231
50	0.224
60	0.219

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 10-3. representa los valores de tiempo y altura obtenidos del ensayo de sedimentación en cochada para una muestra de lodo diluido en donde, luego de que transcurrió un periodo de 60 min pudimos observar claramente el proceso de sedimentación, evidenciado el proceso de sedimentación a través de la diferencia entre la altura inicial de 0.400 m y la altura final de 0.219 m de sólido. Por tal motivo a través de este ensayo pudimos verificar que la muestra de

lodo estaba diluida, que es la condición real en que se presenta el lodo residual de un desarenador, sedimentador, fosa séptica o sistema de lodos activados.

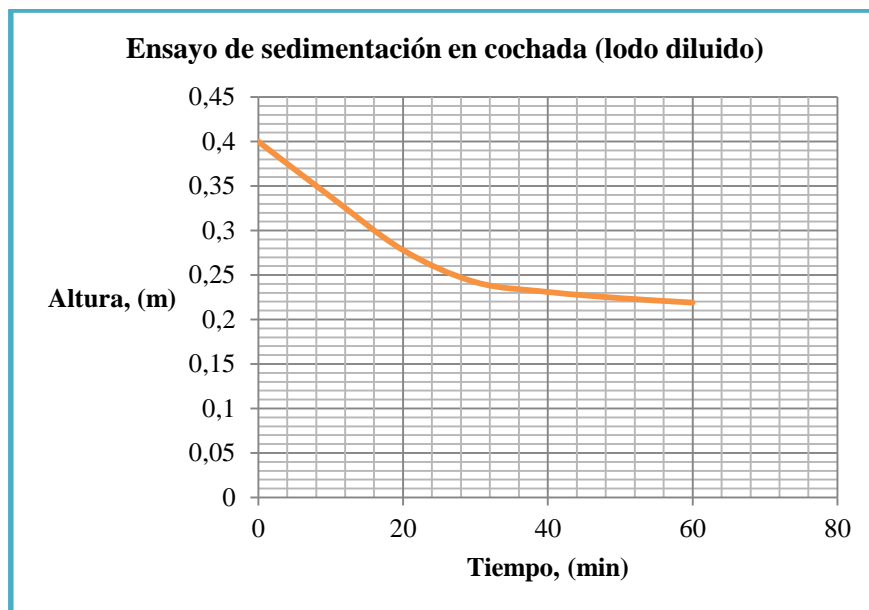


Figura 12-3. Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 12-3. constituye la expresión de los datos del ensayo de sedimentación en cochada de lodo diluido sin aplicar la corrección gráfica en el eje Y.

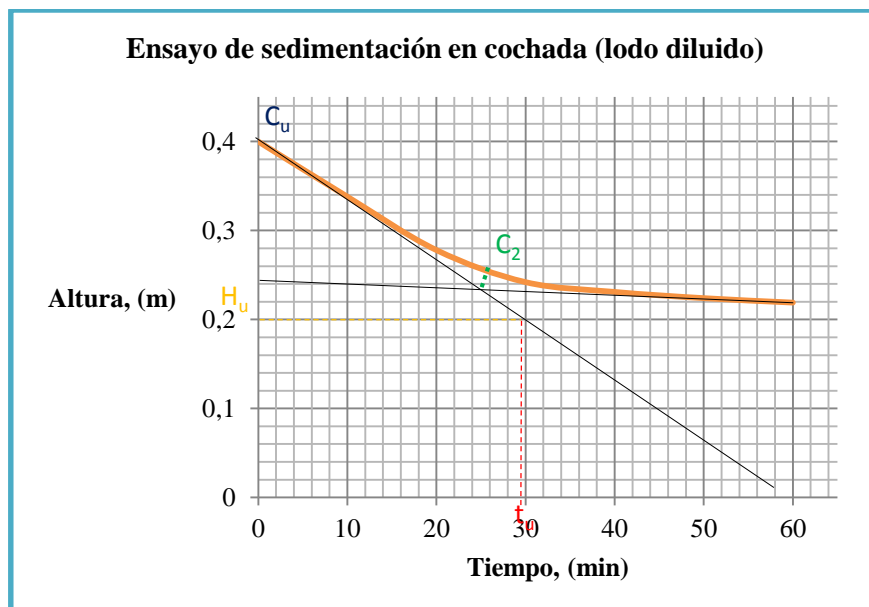


Figura 13-3. Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 13-3. muestra la curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido que a través de su análisis e interpretación se pudo obtener correctamente los criterios en base al procedimiento detallado en el literal 3.2.6.4.1.2.

Tabla 11-3. Resultados del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido.

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración crítica (C_2)	2500	mg/L
Concentración deseada (C_u)	4000	mg/L
Altura de la concentración deseada (H_u)	0.220	m
Tiempo para alcanzar la concentración deseada (t_u)	30.500	min
Velocidad para alcanzar la concentración deseada (v_u)	0.007	m/min

Fuente: (Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016)

La Tabla 11-3. señala los resultados del ensayo de sedimentación en cochada para lodo diluido, la cual permitió conocer la concentración crítica del lodo diluido que fue de 2500 mg/L, alcanzada en un tiempo de 30.500 min, a una velocidad de sedimentación de 0.007 m/min que fue utilizado para predecir que la muestra de lodo diluida en el espesador obtendría un beneficio significativo en su tratamiento.

Tabla 12-3. Volumen en función del tiempo del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.

Tiempo (h)	Volumen (L)
0	60
2	42
4	33
6	29
8	25
10	21
12	19

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 12-3. presenta los datos de tiempo y volumen del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido; para un periodo de tratamiento de 12 horas, mostrando un volumen inicial de 60 mL, un volumen final de 19 L y una diferencia volumétrica de 41 L, evidenciando que la muestra diluida concentró el sólido con mayor eficiencia en relación a la muestra concentrada.

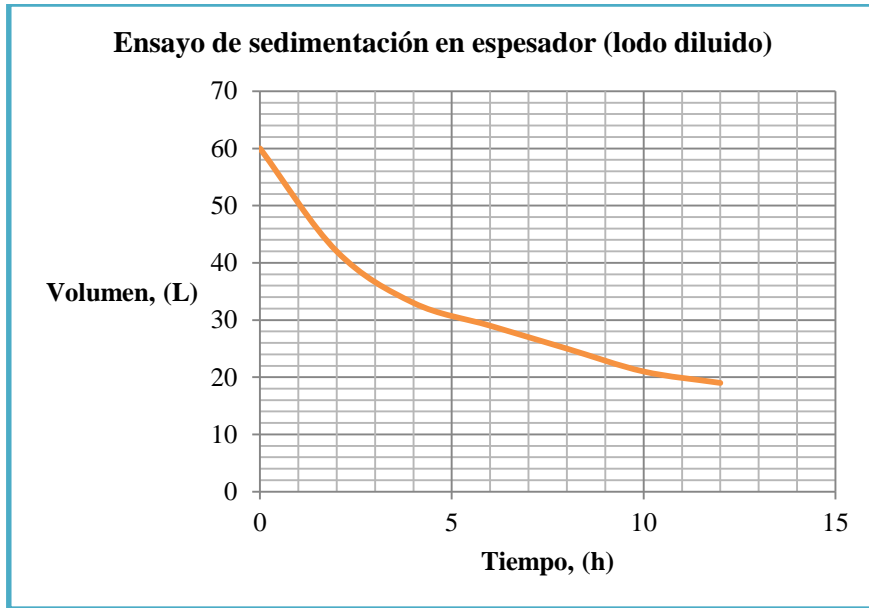


Figura 14-3. Curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La curva de asentamiento del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido sin corrección que agrupa los valores de tiempo y volumen se representada en la Figura 14-3.

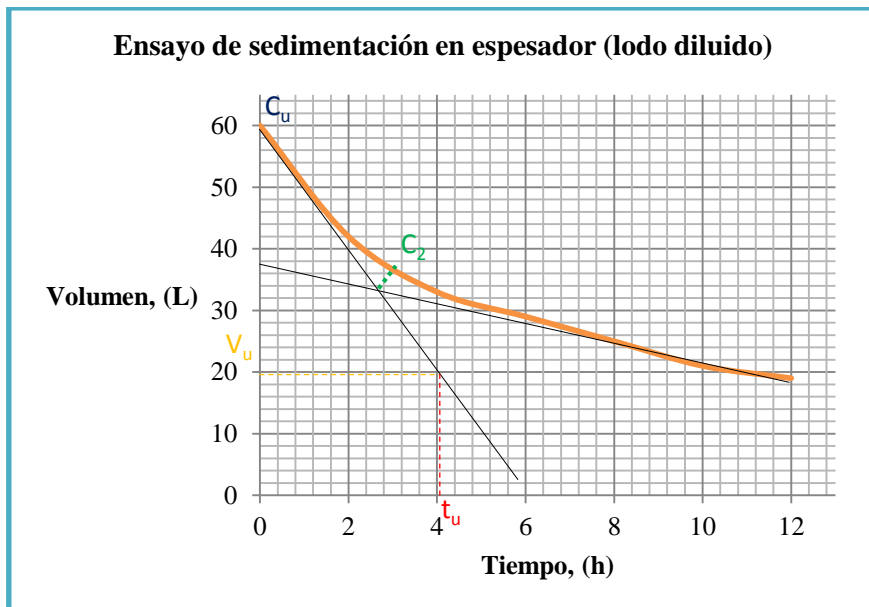


Figura 15-3. Curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 15-3. representa la curva de asentamiento corregida del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido obteniendo criterios especificados en el procedimiento expuesto en el literal 3.2.6.4.2.3.

Tabla 13-3. Resultados del ensayo de sedimentación en espesador para lodo diluido.

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración crítica (C_2)	60.830	% v/v
Concentración deseada (C_u)	100	% v/v
Volumen de la concentración deseada (V_u)	19	L
Tiempo para alcanzar la concentración deseada (t_u)	4.200	h
Caudal para alcanzar la concentración deseada (Q_u)	4.524	L/h

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 13-3. indica los resultados para la muestra de lodo diluido, la cual ingresó en el espesador de lodos por gravedad con un volumen de 60 L y una concentración inicial de 100 %v/v, luego de que la muestra se trató se determinó que para un periodo de tiempo de 4.200 h la muestra alcanzó una concentración crítica de 60.830 %v/v con caudal de sedimentación de 4.524 L/h; que en contraste con la muestra concentrada, la muestra diluida recibió un efecto potencia en el proceso de sedimentación de sólidos ya que visualizó completamente que los sólidos fueron depositados en la parte inferior del espesador, por tanto este concentró el sólido de la muestra en un volumen menor al total; verificando que el tratamiento fue efectivo y no constituyo una pérdida de recurso como sucedió con el lodo concentrado.

3.1.7.2 Ensayos de desaguado en eras de secado

3.1.7.2.1 Ensayo de desaguado para lodo concentrado

Tabla 14-3. Altura en función del tiempo del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado.

Tiempo (h)	Altura (m)
0	0.020
6	0.018
12	0.017
18	0.0165
24	0.016
30	0.0155
36	0.015
42	0.0145

Tabla 14-3. Altura en función del tiempo del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado “Continuación”.

48	0.0145
54	0.014
60	0.014
66	0.014
72	0.014

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Tabla 14-3. muestra los valores del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado, agrupando datos de tiempo y altura del lodo en las eras de secado. El periodo de tratamiento de este ensayo fue de 72 horas, con intervalos de 6 horas empleados para la medición de la altura del lodo en las eras de secado. Para este ensayo la altura inicial fue de 0.020 m mientras la altura final fue de 0.014 m, evidenciando que el lodo a pesar de tener una mayor cantidad de sólidos concentrados no se desaguó por completo, por tanto el tratamiento aplicado no fue en su totalidad eficiente, por lo que representó un gasto de recursos. Efectivamente esto ocurrió principalmente por la textura que el lodo adquirió en el espesador, la cual era el de una sustancia semipermeable la cual no facilitaba el procesos de desaguado.

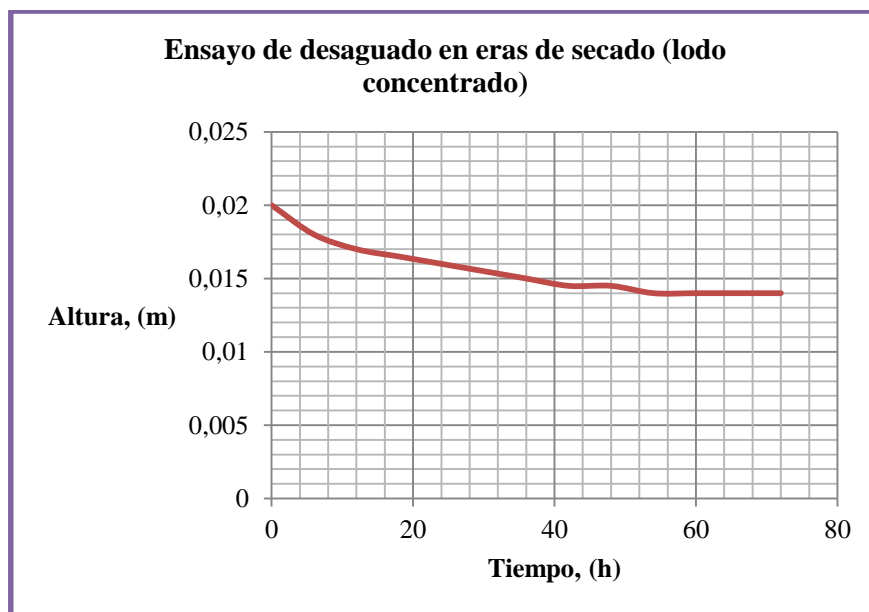


Figura 16-3. Curva de deshidratación del ensayo de desaguado de eras de secado para lodo concentrado.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

En la Figura 16-3. se muestra la curva de deshidratación correspondiente a los datos del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado para ser analizada según el procedimiento detallado en el literal 3.2.6.7.1.3.

Tabla 15-3. Resultados del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de era unitaria (L_u)	0.610	m
Ancho de era unitaria (A_u)	0.400	m
Volumen de lodo húmedo (V_{ih})	0.00488	m ³
Volumen de lodo seco (V_{is})	0.00342	m ³
Volumen de agua eliminada (V_{ae})	0.00146	m ³
Velocidad de desaguado de lodos (v_d)	0.00008	m/h

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Los resultado de la Tabla 15-3. representan el análisis del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo concentrado, en donde tomando en cuenta las dimensiones de la era de secado se analizó volumétricamente el proceso de desaguado, así el volumen de lodo húmedo fue de 0.0048 m³, el volumen de lodo seco fue de 0.00342 m³ y el volumen de agua eliminada fue de 0.00146 m³; obtenidos a una velocidad de 0.00008 m³. Estos resultados obtenidos nos indicaron que el lodo concentrado luego de ser espesado adquiere una textura que limita el proceso de desaguado, requiriendo que el periodo de tratamiento se extienda a un mayor número de días.

3.1.7.2.2 Ensayo de desaguado para lodo diluido

Tabla 16-3. Altura en función del tiempo del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido.

Tiempo (h)	Altura (m)
0	0.020
6	0.014
12	0.011
18	0.009
24	0.008
30	0.007
36	0.0065
42	0.006
48	0.005
54	0.0045
60	0.004
66	0.0035
72	0.003

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

En la Tabla 16-3. los valores del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido fueron representados agrupando los datos de tiempo y altura del lodo en las eras de secado; en donde el lodo diluido permaneció por un periodo de tratamiento de 72 horas, con intervalos de 6 horas empleados para la medición de la altura del lodo en las eras de secado. Es así como el lodo diluido presentó una altura inicial de 0.020 m y una altura final de 0.003 m, lo cual representó que el lodo diluido espesado tuvo una mejor respuesta frente al tratamiento ya que este se desaguó por completo, por tanto el tratamiento aplicado fue altamente efectivo. En contraste con el lodo concentrado, el lodo diluido presentó una textura consistente sin evidenciar rastros de impermeabilidad, facilitando así el proceso de desaguado.

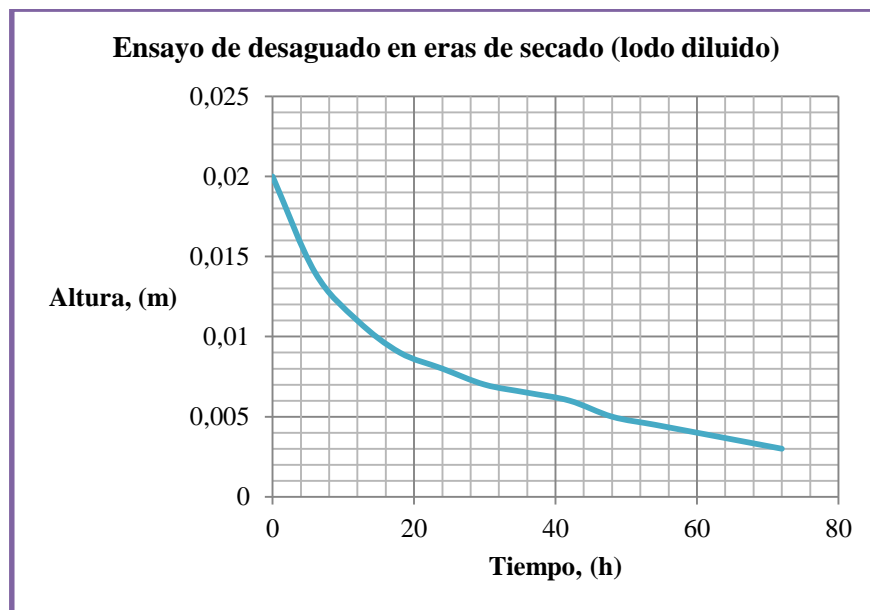


Figura 17-3. Curva de deshidratación del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 17-3. representa la curva de deshidratación para los datos del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido para su análisis según el procedimiento detallado en el literal 3.2.6.7.1.3.

Tabla 17-3. Resultados del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de era unitaria (L_u)	0.610	m
Ancho de era unitaria (A_u)	0.400	m
Volumen de lodo húmedo (V_{ih})	0.00488	m ³
Volumen de lodo seco (V_{is})	0.00073	m ³
Volumen de agua eliminada (V_{ae})	0.00415	m ³
Velocidad de desaguado de lodos (v_{dl})	0.00024	m/h

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Los resultados de la Tabla 17-3. representan el análisis del ensayo de desaguado en eras de secado para lodo diluido, que después de haber considerado las dimensiones de las eras de secado se pudo analizar volumétricamente el ensayo, es así como el volumen de lodo húmedo fue de 0.0048 m³, el volumen de lodo seco fue de 0.00073 m³ y el volumen de agua eliminada fue de 0.00415 m³; obtenidos a una velocidad de 0.00024 m³. Estos resultados obtenidos probaron que la textura del lodo diluido es la responsable de la eficiencia del proceso de desaguado, ya que el sólido fue separado del líquido cumpliendo con el objetivo del equipo.

3.1.8 Caracterización del lodo residual inicial, intermedio y final del sistema de tratamiento de lodos residuales

Tabla 18-3. Resultados de la caracterización del lodo residual inicial, intermedia y final del sistema de tratamiento de lodos residual en el espesador de lodos por gravedad.

Espesador de lodos por gravedad					
Lodo concentrado			Lodo diluido		
SST (mg/L)		e (%)	SST (mg/L)		e (%)
A	E		A	E	
3980	4245	6.24	2335	6703	65.16

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Tabla 19-3. Resultados de la caracterización del lodo residual inicial, intermedia y final del sistema de tratamiento de lodos residual en las eras de secado.

Eras de secado											
Lodo concentrado						Lodo diluido					
SST (mg/L)		e (%)	Humedad (%)		e (%)	SST (mg/L)		e (%)	Humedad (%)		e (%)
A	E		A	E		A	E		A	E	
4245	1003	76.37	96.21	69.88	27.37	6703	48	99.28	81.77	48.13	41.14

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Las Tablas 18-3. y 19-3. representan los resultados de la caracterización del lodo residual inicial, intermedia y final del sistema de tratamiento de lodos residuales, que en concreto nos indican que el tratamiento para lodo concentrado es menos efectivo que para lodo diluido, representando un gasto innecesario de recursos. Claramente esto fue verificado con la caracterización del lodo concentrado y diluido al analizar en su concentración de SST para el afluente y efluente del espesador de lodos por gravedad; mientras que para las eras de secado se analizó en el agua eliminada la concentración de SST en el efluente y en el lodo seco el porcentaje de humedad tanto en el afluente como efluente. Así eficiencia del espesador de lodos por gravedad para lodo concentrado fue de 6.24% y para lodo diluido fue de 65.16% en lo que respecta al lodo residual; mientras que la eficiencia de las eras de secado para lodo concentrado fue de 76.37% y para lodo diluido fue de 99.28% en lo que respecta al agua eliminada y en lo que respecta al lodo seco la eficiencia para lodo concentrado fue de 27.37% y para lodo diluido fue de 41.14%. Por tanto notamos claramente que en caracterización de muestras el tratamiento de lodos residuales es más eficiente para muestra diluida que para muestra concentrada, indicando que la muestra diluida favorece al tratamiento de lodos residuales en comparación a la muestra concentrada, ya que se optimiza tiempo y recursos.

Tabla 20-3. Resultados volumétricos de las pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residual en el espesador de lodos por gravedad.

Espesador de lodos por gravedad					
Lodo concentrado			Lodo diluido		
Agua residual (m ³ /batch)	Lodo residual (m ³ /batch)		Agua residual (m ³ /batch)	Lodo residual (m ³ /batch)	
0.004	A	E	0.041	A	E
	0.060	0.056		0.060	0.019

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Tabla 21-3. Resultados volumétricos de las pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residual en las eras de secado.

Eras de secado					
Lodo concentrado			Lodo diluido		
Agua residual (m ³ /batch)	Lodo residual (m ³ /batch)		Agua residual (m ³ /batch)	Lodo residual (m ³ /batch)	
0.001664	A	E	0.004148	A	E
	0.00488	0.003426		0.00488	0.000732

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Las Tablas 20-3. y 21-3. representan los resultados volumétricos de la pruebas experimentales del sistema de tratamiento de lodos residuales, que se basó en el régimen de trabajo del sistema el cual fue discontinuo, permitiendo expresar valores volumétricos en forma de caudal en unidades de m^3/batch ; este análisis se realizó para el agua residual y lodo residual para muestras concentrada y muestra diluida en el espesador de lodos por gravedad y en las eras de secado, considerando que la muestra total de lodo residual contiene tanto agua como sólido es decir, agua residual y lodo residual, respectivamente. En la muestra concentrada el agua residual entró al espesador de lodos por gravedad un caudal de $0.004 \text{ m}^3/\text{batch}$ y salió de las eras de sacado un caudal de $0.001664 \text{ m}^3/\text{batch}$; mientras que el lodo residual entró en el espesador de lodos por gravedad un caudal de $0.056 \text{ m}^3/\text{batch}$ y salió de las eras de sacado un caudal de $0.003426 \text{ m}^3/\text{batch}$. Para la muestra diluida el agua residual entró al espesador de lodos por gravedad un caudal de $0.041 \text{ m}^3/\text{batch}$ y salió de las eras de sacado un caudal de $0.00414 \text{ m}^3/\text{batch}$; mientras que el lodo residual entró en el espesador de lodos por gravedad un caudal de $0.019 \text{ m}^3/\text{batch}$ y salió de las eras de sacado un caudal de $0.000732 \text{ m}^3/\text{batch}$. Con esto interpretamos que en volumen el tratamiento de lodos para muestra concentrada es más eficiente que para muestra diluida, sin embargo el tratamiento de la muestra concentrada aunque su eficiencia en volumen sea superior a la muestra diluida, los recursos requeridos para su tratamiento constituye un gasto innecesario de recursos.

3.1.9 Implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

Los resultados de la implementación de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio consistió en la ejecución de dos prácticas de laboratorio detalladas en las hojas técnicas correspondientes a la Guía de Prácticas de Laboratorio, realizadas con 28 estudiantes de noveno semestre de la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales de la Carrera de Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH en el Laboratorio de Aire en coordinación con el docente de la cátedra.

Las prácticas de laboratorio fueron llevadas a cabo en un lapso de 2 horas, las cuales una vez concluyeron los estudiantes debieron regresar según los tiempos detallados en las hojas técnicas a fin de la obtención de datos útiles para la entrega del informe de laboratorio al docente de la cátedra. Además, para aportar con la investigación los estudiantes realizaron una encuesta final con preguntas vinculadas a su realización y a posibles mejoras en el sistema después de realizar las prácticas de laboratorio y enriquecer el proceso de aprendizaje.

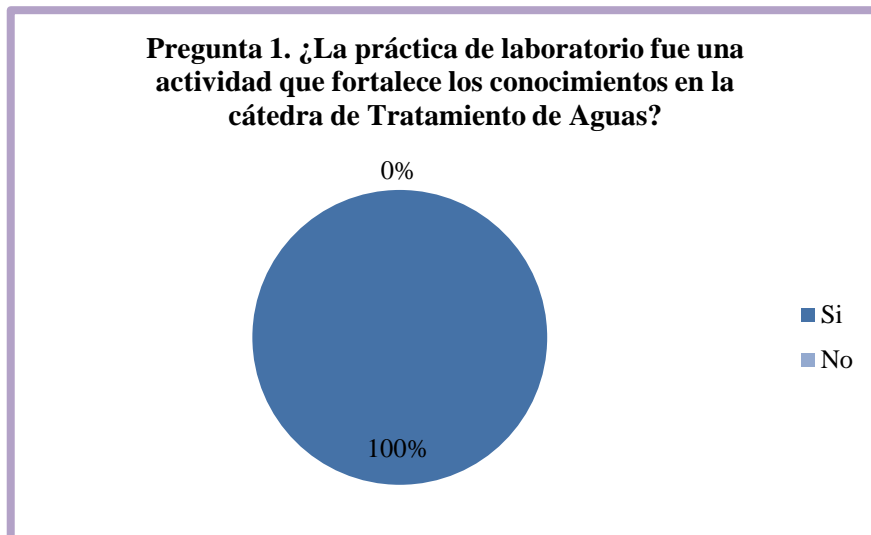


Figura 18-3. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 18-3. muestra la pregunta 1 de la encuesta final, la cual representa que las prácticas de laboratorio realizadas en el sistema de tratamiento propuesto, por los estudiantes de noveno semestre de la cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales de la Carrera de Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH en el Laboratorio de Aire, fue una actividad que fortaleció en un 100% los conocimientos en la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales, lo cual indicó que tanto el espesador de lodos por gravedad como las eras de secado cumplieron con el propósito de contribuir con el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

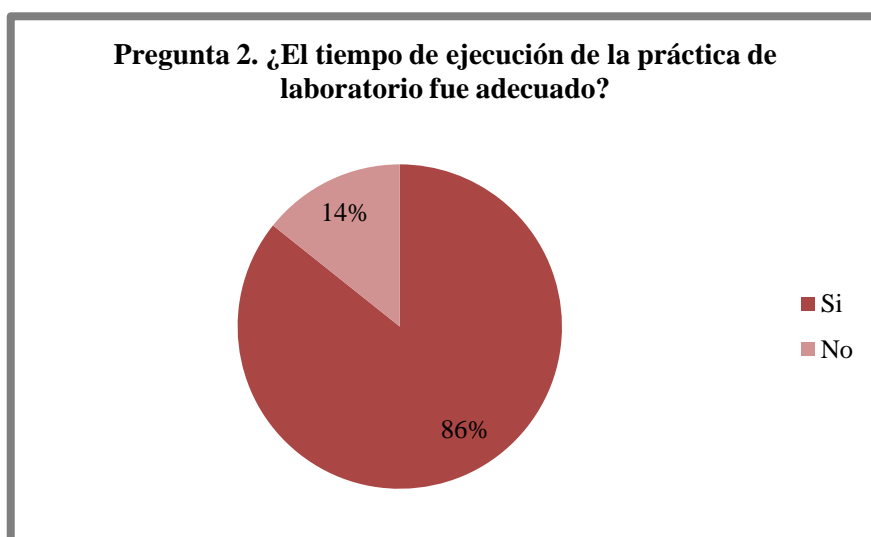


Figura 19-3. Resultados de la pregunta 2 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

A través de la pregunta 2 de la encuesta final mediante la Figura 19-3. se comprobó que un 86% de los estudiantes consideraron que el tiempo de ejecución de la práctica de laboratorio en general fue adecuado que correspondió 2 horas y luego adicionándose intervalos de tiempo según indicaron las hojas técnicas detalladas en la Guía de Prácticas de Laboratorio, por otro lado un 14% consideró que el tiempo no fue adecuado y por la experiencia de la realización de la practica con los estudiantes podemos decir que el tiempo debió ser extendido.

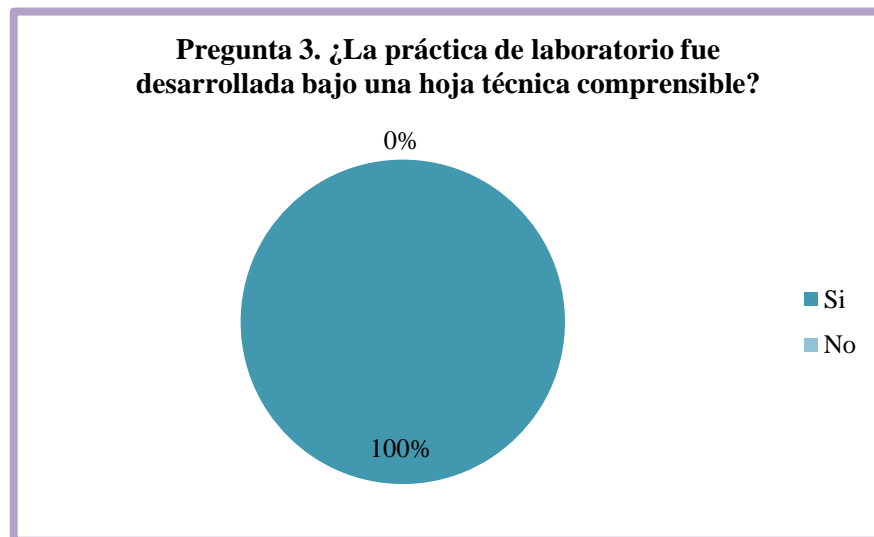


Figura 20-3. Resultados de la pregunta 3 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La Figura 20-3. muestra la pregunta 3 de la encuesta final, la cual permitió conocer que un 100% de los estudiantes consideran que las hojas técnicas detalladas en la Guía de Prácticas de Laboratorio, fueron desarrolladas de tal manera su comprensión es absolutamente correcta, permitiéndonos ratificar en su totalidad que las hojas técnicas fueron desarrolladas adecuadamente para la ejecución de las prácticas de laboratorio.

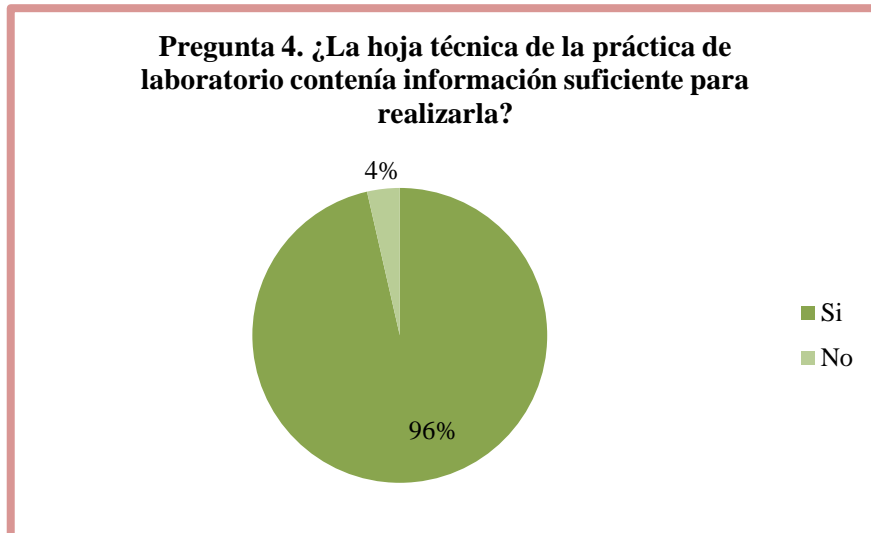


Figura 21-3. Resultados de la pregunta 4 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

La pregunta 4 de la encuesta final según la Figura 21-3. nos permitió determinar que el 96% de los estudiantes que realizaron las prácticas aceptaron que las hojas técnicas detalladas en la Guía de Prácticas de Laboratorio contenían la información suficiente la para la ejecución de las prácticas de laboratorio que conllevó a mantener la información que se había establecido de la misma manera sin efectuar cambios en su contenido a pesar de conocer que tan solo un 4% de los estudiantes creyeron que las hojas técnicas no contenían la información de la técnica para realizar la práctica de laboratorio.

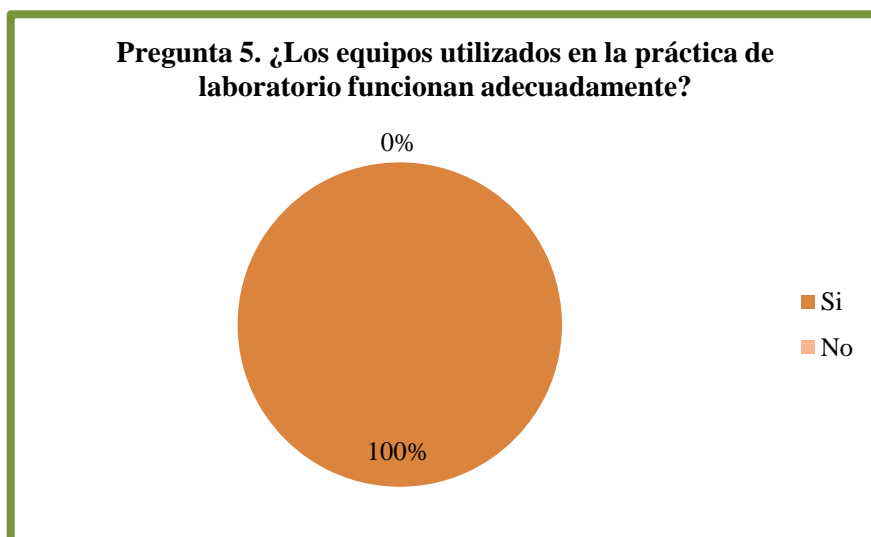


Figura 22-3. Resultados de la pregunta 5 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Se evidenció a través de la pregunta 5 de la encuesta final en la Figura 22-3. que la aceptación de los equipos de laboratorio propuestos en esta investigación tuvieron una aceptación muy favorable con los estudiantes resaltando que el 100% acordó que los equipos funcionaban adecuadamente ratificando que el diseño y construcción de estos, fueron realizados para fortalecer la falta de prácticas de laboratorio.

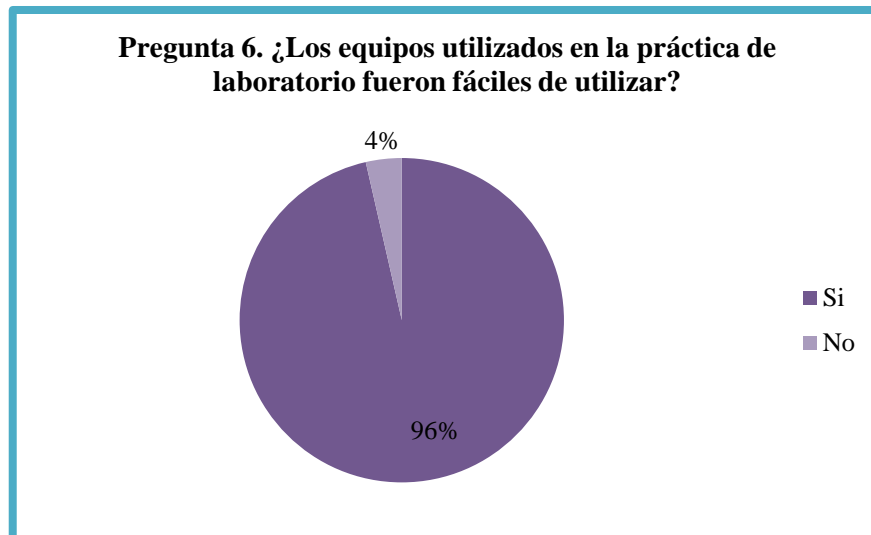


Figura 23-3. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Se justificó a través de la pregunta 6 de la encuesta final en la Figura 23-3. que el 96% de los estudiantes coincidieron que los equipos utilizados en la práctica de laboratorio fueron fáciles de usar y que un 4% de los estudiantes creyeron que no fueron fáciles de utilizar; estos resultados se justifican debido a que por el número de participantes de la práctica no todo tuvieron acceso a la manipulación de los equipos, sin embargo los estudiantes en general coincidieron que a causa del diseño de los equipos su operación resulta sencilla.

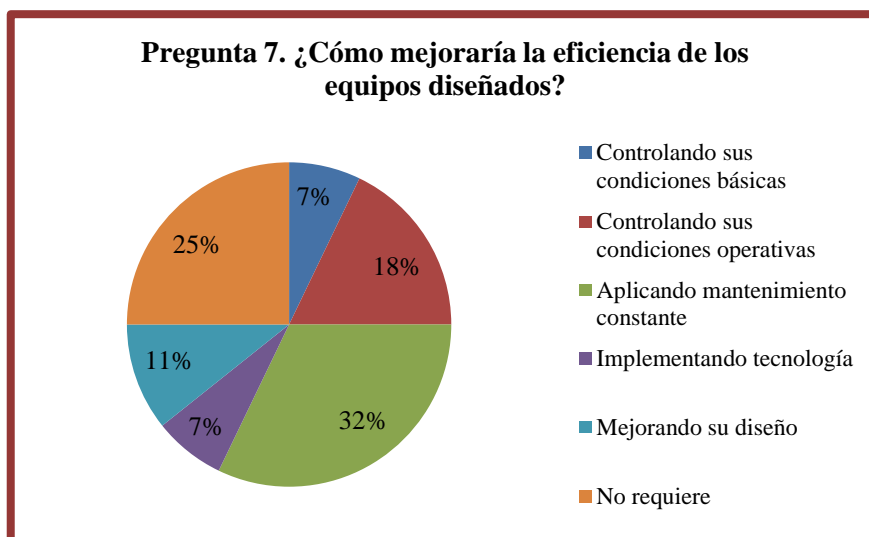


Figura 24-3. Resultados de la pregunta 7 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Se evidenció a través de la pregunta 7 de la encuesta final en la Figura 24-3. que a pesar que los estudiantes consideraron que los equipos fueron eficientes en general, para mejorar de alguna manera los equipos un 32% los estudiantes que realizaron la práctica de laboratorio creyeron que la eficiencia de los equipos diseñados mejorarían aplicando un mantenimiento constante a los equipos lo cual significó que los equipos trabajarían a su máxima capacidad si se evita cualquier tipo de inconveniente después de sus utilización haciendo necesaria la implementación de un manual de mantenimiento el cual se encuentra en el Manual de Operación y Mantenimiento elaborado para realizar un mantenimiento preventivo del equipo; por otro lado un 25% de los estudiantes también creyeron que tras la utilización de los equipos estos no requieren de nada para mejorar su eficiencia pues estos son completamente eficientes; a continuación un 18% de estudiantes consideraron que los equipos mejorarían su eficiencia controlando sus condiciones operativas, es decir, generando un manual de operación de los equipo a fin de utilizarlos tomando consideraciones técnicas optimizando así su capacidad de trabajo; un 11% de los estudiantes creen que la eficiencia de los equipos también mejorarían modificando su diseño al cambiar el dimensionamiento de los equipos lo cual resulta innecesario pues en base a los resultados obtenidos en la pruebas experimentales en el literal 3.1.6 los equipos son altamente eficientes; así también un 7% de los estudiantes pensaron que la eficiencia de los equipos mejoraría controlando las condiciones básicas del equipo, es decir, evitando que los materiales del equipo con el uso continuo afecten la eficiencia de los equipos lo cual se solventará con un manual de mantenimiento el cual se encuentra en el Manual de Operación y Mantenimiento elaborado para realizar un mantenimiento correctivo del equipo; finalmente un 7% de los estudiantes que realizaron la práctica de laboratorio creyeron que la eficiencia de los equipos mejoraría implementando mejor tecnología lo cual permitiría explotar

aun una mayor eficiencia que poseen los equipos, entre la posible tecnología a implementar a los equipos podía ser un moto reductor de velocidad más lentas para el ELG y una mayor cantidad de focos de calor para las EDS y ambos equipos se podrían tecnificar con una controlador lógico programable.

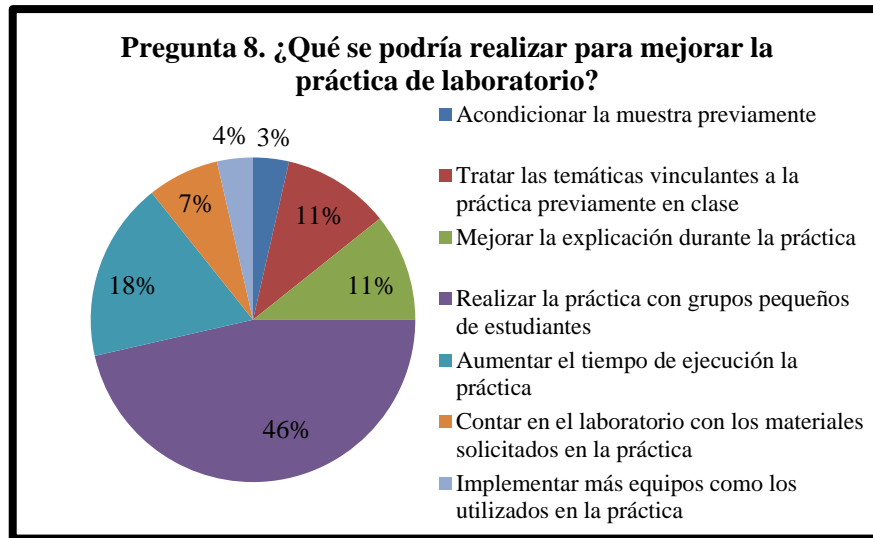


Figura 25-3. Resultados de la pregunta 8 de la encuesta final.

Fuente: Realizado por Pérez, Jean Pierre, & Zumbana, Damian, 2016.

Finalmente, según la pregunta 8 de la encuesta final en la Figura 25-3. se evidencia que aunque los estudiantes y el docente de la Cátedra de Tratamiento de Aguas Residuales se encontraron muy satisfechos con la práctica de laboratorio en los equipos propuestos un 46% de los estudiantes consideraron que la realización de la práctica podría mejorar realizándola con grupos pequeños de estudiantes pues la práctica se manejó con un grupo de 28 estudiante lo cual limita que el mensaje sea comprendido en el mismo nivel por todos los estudiantes, lo ideal sería por tanto que la práctica se realice en grupo de 8 a 12 personas para mejorar el procesos de aprendizaje; un 18% de los estudiante creyeron que al aumentar el tiempo de la ejecución de la práctica esta mejoraría y en general aumentaría si se realizara en grupos de trabajo puesto que prácticamente la práctica se realizaría dos veces; así también un 11% de los estudiantes conceptuó que para mejorar la realización de la práctica se debería perfeccionar su explicación por parte del técnico docente lo cual mejoraría notablemente al trabajar con grupos pequeños de estudiantes porque así la información llegaría de forma más autónoma a cada estudiante fortaleciendo su aprendizaje; así también un 11% de los estudiantes consideró pertinente manifestar que la realización de la práctica de laboratorio mejoraría si se tratarían las temáticas vinculantes a la práctica previamente en clase con el docente; además un 7% de los estudiantes consideraron que la práctica de laboratorio mejoraría contando en el laboratorio con los materiales solicitados en la práctica ya que durante su ejecución no siempre se puede acceder

oportunamente a los materiales necesarios ya que muchas de las veces se encuentran ocupados por otros estudiantes; por otra parte un 4% de los estudiantes coincidieron en que la realización de la práctica mejoraría si se implementarían más equipos como los utilizados en la ejecución de la práctica para optimizar tiempo y abarcar un número superior de estudiantes; finalmente un 3% de los estudiantes que realizaron la práctica acordaron que su realización mejoraría si se acondicionaría la muestra previamente lo cual optimizaría el tiempo de ejecución de la práctica pero no apartaría con el mismo aprendizaje ya que se omitiría el paso inicial para el tratamiento de lodos residuales restando valor académico a la práctica de laboratorio.

En general podemos decir que la implementación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio fue absolutamente un éxito tanto como con el docente como con los estudiantes evidenciando que la práctica de laboratorio realizada en el equipos propuestos en esta investigación contribuyeron a enriquecer el proceso de aprendizaje estudiante - docente ya que vincula la práctica con la teoría a través de una forma didáctica y dinámica con base en un sustento científico otorgándole una herramienta al Ingeniero en Biotecnología Ambiental.

3.1.10 Validación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio

La validación del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio es el resultado de todo el proceso investigativo realizado en el trabajo de titulación; evaluando la justificación de la experimentación, diseñando el sistema, construyendo los equipos, realizando pruebas experimentales e implementando el sistema; podemos decir en base a los resultados obtenidos durante la ejecución de la investigación, el sistema de tratamiento se convirtió en una herramienta académica para los estudiantes de la Carrera de Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH fortaleciendo su proceso de aprendizaje.

Además, elaboramos y corregimos los documentos definitivos que ayudaron a la realización de prácticas de laboratorio y a la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de lodos residuales a escala de laboratorio generando así una Guía de Practicas de Laboratorio, la cual posee las técnicas de las prácticas de laboratorio; y un Manual de Operación y Mantenimiento, en el cual se detalla la técnica adecuada para su utilización.

CONCLUSIONES

- Se identificó la necesidad del diseño e implementación de un sistema de tratamiento de lodos residuales en la Facultad de Ciencias - ESPOCH a través del nivel de aceptación que este tendría, mediante los resultados obtenidos en encuestas virtuales sometidas a los estudiantes de los niveles superiores de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, obteniendo un valor de aceptación del 99%.
- La caracterización física, química y microbiológicamente del lodo residual generado en una PTAR doméstica permitió determinar los parámetros utilizados en el diseño del sistema y establecer el tipo de lodo que puede tratar, el cual debe tener una concentración inicial de sólidos suspendidos totales menor o igual a 1868 mg/L y un nivel de degradación del 90%.
- Se diseñó y construyó un espesador de lodos por gravedad con una geometría cilíndrica cónica con un diámetro del cilindro de 0.610 m, un diámetro de la fosa de lodos de 0.150 m y una altura total de 0.650 m; unas eras de secado con una geometría cúbica rectangular de superficie de doble pendiente con una longitud total de 0.610 m, un ancho total de 0.800 m y una altura total de 0.650 m; de acuerdo a la escala de construcción del 11% establecido en función de espacio físico disponible en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, alcanzando un costo de fabricación de 1682.55 USD.
- La eficiencia del espesador de lodos por gravedad en función de la concentración de sólidos suspendidos totales para la muestra concentrada fue de 6.25% y para la muestra diluida de 65.19%, mientras que la eficiencia de las eras de secado en función de la concentración de sólidos suspendidos totales para la muestra concentrada fue de 76.37% y para la muestra diluida de 99.28% y en función del porcentaje de humedad para la muestra concentrada fue de 27.37% y para la muestra diluida de 41.14%.
- El sistema de tratamiento de lodos implementado en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH constituye una herramienta académica práctica para los estudiantes, brindándoles una oportunidad de fortalecer y complementar sus conocimientos teóricos, mediante la realización de prácticas de laboratorio, que les permite formarse como profesionales competentes.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda adaptar un regulador de velocidad al moto reductor, para aportar mayor complejidad a los ensayos de sedimentación.
- Se recomienda extender el período de secado de lodos de 72 horas a 168 horas para mejorar la eficiencia de las eras de secado y obtener un lodo seco, totalmente estabilizado, que permita su disposición final cumpliendo los parámetros establecidos en la normativa legal vigente.
- Se recomienda dar mantenimiento después de cada ensayo a todos los componentes del sistema de tratamiento de lodos residuales, esto incluye el espesador de lodos por gravedad, su sistema de agitación, las eras de secado, su medio filtrante, su sistema de calor y todas las conexiones de tubería.
- Se recomienda analizar el lodo seco resultante del sistema de tratamiento de lodos residuales como posible bioabono, medio de cultivo o mejorador de suelos.
- Se recomienda utilizar en el sistema de tratamiento de lodos residuales muestras de lodo residual provenientes de PTAR domésticas, con el objetivo de cuidar la integridad de todos los componentes que forman parte de este sistema de tratamiento.
- Se recomienda desarrollar además de los ensayos propuestos en esta investigación nuevos ensayos que permitan analizar de manera didáctica temas referentes a sedimentación, mezcla rápida, coagulación y floculación para potencializar al máximo su uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Alcaldía Mayor de Bogotá.** *Tratamiento de aguas y lodos de la PTAR Salitre.* [En línea]. Bogotá: 2005. [Consulta: 25 de noviembre de 2015]. Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wps/v61/wps/portal!/ut/p/c5/hY7LDoIwEEW_hS-YofQBS1QEEqBqo1I2pDEEMTxcGBP-XogbN8jM8tx7ZqCAaXvzbnrzaobetJBDwUvXVqkSEUEpyA5jPwhc7tANPdGJa15uQz-iIkGU5IJIMqaOeFYOxs5K-zrf-0mEbO9hLJmXyDS0EdmX__PPHBfGR8iioavgvGLRHuQcNBRi8Vthg26r2txGeHY5
2. **ASTUDILLO CÓRDOVA, Freddy Leonardo, & BERMEO BARROS, Luis Francisco.** *Diseño de un sistema automatizado de secado, almacenamiento y despacho de lodos deshidratados de la planta de tratamiento de agua potable Sustag y simulación mediante un software especializado.* [En línea]. (Tesis Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Mecánica, Cuenca - Ecuador. 2011. pp. 1 - 249. [Consulta: 05 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1369/14/UPS-CT002052.pdf>
3. **BERMEO GARAY, Martha., et al.** *Planta de tratamiento de aguas residuales, lodos y lixiviados del efluente de una industria láctea.* [En línea]. (Tesis Pregrado). Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química, Guayaquil - Ecuador. 2005. pp. 7 - 53. [Consulta: 05 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/419/1/TESIS%20953.pdf>
4. **CABEZAS YANES, Lucía Yolanda.** *Diseño de un sistema de tratamiento de lodos provenientes de EPMAPA - Santo Domingo.* [En línea]. (Tesis Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Riobamba - Ecuador. 2011. pp. 1 - 39. [Consulta: 05 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1656/1/96T00142.pdf>
5. **CATILLO REINOSO, Ana María, & GUERRA HUILCA, María José.** *Diseño e implementación de una PTAR por lodos activos a escala de laboratorio, Facultad de Ciencias - ESPOCH.* [En línea]. (Tesis Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Riobamba - Ecuador. 2014. pp. 1 - 43. [Consulta: 05 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3403/1/236T0097%20.pdf>
6. **DIRECCIÓN Metropolitana de Medio Ambiente** (Ecuador) Normas Técnicas para la aplicación de la codificación del título V, “Del Medio Ambiente”, libro segundo, del código municipal para el Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador, 2005. pp. 41-43.
7. **ESPINOZA CORDERO, María Fernanda, & CAMPOVERDE ORTIZ, Manuel Alejandro.** *Evaluación del desempeño de los espesadores a gravedad de la planta de aguas residuales de Ucubamba.* [En línea]. (Tesis Pregrado). Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Cuenca - Ecuador. 2013. pp. 1 - 43. [Consulta: 05 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4469>

8. **FRANCISCO ATENCIO, Jenny., et al.** “Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima”. Revista de la Sociedad Química del Perú. [En línea], 2011. (Perú) 77 (1), pp. 2 - 7. [Consulta: 02 de noviembre de 2015]. ISSN: 1810 - 634X. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2011000100008&script=sci_arttext
9. **HESS, Max Lothar.** *Espesamiento de lodos: a gravedad y por flotación: Mecanismos y criterios de diseño.* [En línea]. Sao Pablo: 1996. [Consulta: 20 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/05862/05862-17.pdf>
10. **HUERTA, Oscar, & SOLIVA, Montserrat.** *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas.* [En línea]. Valsáin: 2004. [Consulta: 25 de noviembre de 2015]. Disponible en: http://mie.esab.upc.es/ms/recerca_experimentacio/articulos_ESAB/Compostaje%20lodos.pdf
11. **INSTITUTO Ecuatoriano de Normalización** (Ecuador). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Libro VI Anexo 6. Quito, Ecuador, 2015. pp. 41-42.
12. **LASHERAS, Ana Marta.** *Tratamiento de fangos, técnicas de espesamiento y estabilización.* [En línea]. Navarra: 2013. [Consulta: 10 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/LAsheras.pdf>
13. **LIMÓN MACÍAS, Juan Gualberto.** *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o Recurso?* [En línea]. Guadalajara: 2013. [Consulta: 10 de diciembre de 2015]. Disponible en: http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf
14. **METCALF & EDDY.** *Ingeniería de aguas residuales: Vol. 1 y Vol. 2: Tratamiento, vertido y reutilización.* 3a edición. Madrid - España: McGraw - Hill, 1996, pp. 1 - 1043. ISBN: 8448116127
15. **Municipio Metropolitano de Quito.** *Manejo ambientalmente adecuado de lodos provenientes de plantas de tratamiento.* [En línea]. Quito: 1999. [Consulta: 10 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/repamar/gtzproye/lodos/lodos.html>
16. **ORTIZ RAMOZ, Axel Iván.** *Impacto de lodos residuales de la planta de tratamiento de la UAAAN en calabacita tipo zucchini (Cucúrbita pepo L.).* [En línea]. (Tesis Pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Ingeniería, Coahuila - México. 2013. pp. 3 - 23. [Consulta: 15 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4494/62671%20%20ORTIZ%20RAMOS,%20AXEL%20IVAN%20%20TESIS.pdf?sequence=1>

- 17. RAMALHO, Rubens Sette., et al.** *Tratamiento de aguas residuales*. [En línea]. Barcelona - España: Reverté S.A., 1996. [Consulta: 21 de diciembre de 2015]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PP1&lpg=PP1&dq=r.s.+ramalho+tratamiento+de+aguas+residuales+fecha+de+publicaci%C3%B3n&source=bl&ots=OBuaBYeDpa&sig=33UxHK7zr3jpuTBPi-GNyd_OVe8&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj0_OaQlZXKAhVFFt4KHaf0AkgQ6AEIGjAA#v=onepage&q=r.s.%20ramalho%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20fecha%20de%20publicaci%C3%B3n&f=false. ISBN: 8429179755
- 18. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto.** *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. 2a edición. Bogotá - Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002, pp. 700 - 900. ISBN: 9588060133
- 19. TREJOS VÉLEZ, Mariana, & AGUDELO CARDONA, Natalia.** *Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa "Comestibles La Rosa" como alternativa para la generación de biosólidos*. [En línea]. (Tesis Pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, Administración Ambiental, Pereira - Colombia. 2012. pp. 18 - 28. [Consulta: 20 de octubre de 2015]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2775/1/62839T787.pdf>
- 20. United States Environmental Protection Agency.** *"Programa Nacional De Lodos Residuales Cloacales"*. National Service Center for Environmental Publications. [En línea], 1994. (United States of America) 35 (2), p. 1. [Consulta: 02 de noviembre de 2015]. NSCEP: 833F94016. Disponible en: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000UDTP.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP A&Index=1991%20Thru%201994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C91THRU94%5CTXT%5C00000017%5C2000UDTP.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=p%7Cf&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1>

ANEXOS

ANEXO A: Caracterización preliminar del lodo residual de la PTAR “Tiugua El Parque” previo al diseño del sistema de tratamiento.



Fotografía 1. Medición del tirante del agua.



Fotografía 2. Recolección de lodo de la fosa séptica.

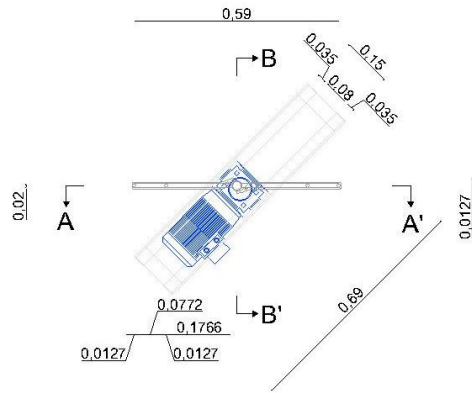


Fotografía 3. Trasvase de lodo a los contenedores para el análisis.

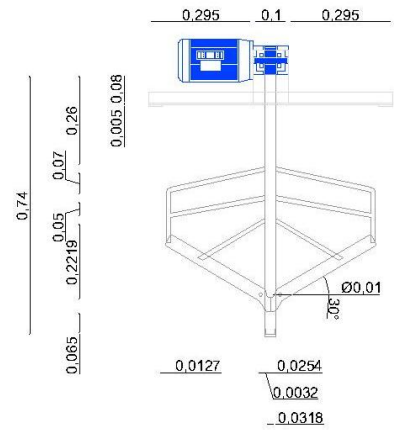
ANEXO A: Planos de construcción.

LISTA DE ACCESORIOS DEL ELG				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR ESTIMADO
1	Manija del eje de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
2	Manija del eje de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
3	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
4	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
5	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
6	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
7	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
8	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
9	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
10	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
11	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
12	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
13	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
14	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
15	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
16	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
17	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
18	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
19	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000
20	Espejo de PVC 20x20x2	1	un	0.5000

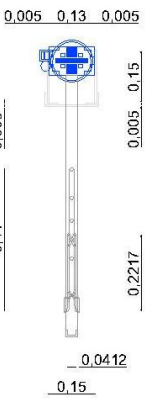
	Facultad de Ciencias Escuela de Ciencias Químicas Carrera de Ingeniería en Biotecnología Año 2015
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UNA PTAR A ESCALA DE LABORATORIO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH (2015)	
PLANOS A DETALLE DE LE ESPESADOR DE LODOS POR GRAVEDAD	
DISEÑADOR - Pérez Jimoz, Juan Ponce - Zumbana López, Edison Damían	LAY OUT - 1 de 4
DISEÑADOR - Pérez Jimoz, Juan Ponce - Zumbana López, Edison Damían	ESCALA - Indicadas
APROBADOR - Dr. Gerardo León Chimbomba	FECHA - 01.03.2016



Sistema de agitación del ELG
Vista planta
Escala 1:10

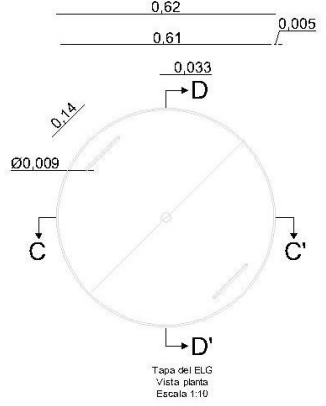


Sistema de agitación del ELG
Vista longitudinal - Corte A-A'
Escala 1:10



Tapa del ELG
Vista longitudinal - Corte C-C'
Escala 1:10

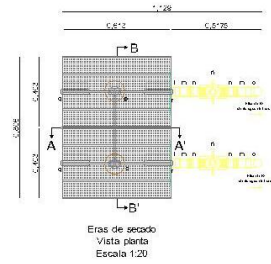
Tapa del ELG
Vista frontal - Corte D-D'
Escala 1:10



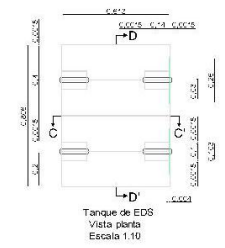
Tapa del ELG
Vista planta
Escala 1:10

	Facultad de Ciencias Escuela de Ciencias Químicas Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental
	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE Lodos RESIDUALES DE UNA PTAR A ESCALA DE LABORATORIO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH 2019
COPIA #118	PLANOS A DETALLE DEL ESPESADOR DE Lodos POR GRAVEDAD (SISTEMA DE AGITACIÓN Y TAPA)
DISEÑADOR Pérez Jinoz, Joan Pairo Zunibana López, Edison Damián	PÁGINA 2 de 4
DISEÑADOR Pérez Jinoz, Joan Pairo Zunibana López, Edison Damián	ESCALA Indicadas
APROBADOR Dr. Gerardo León Chimbabala	FECHA 01.03.2016

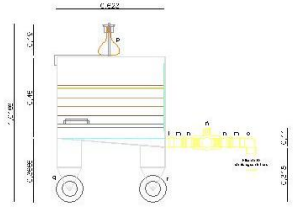
LISTA DE ACCESORIOS DE LAS EDS				
ITEM	CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION	
1	2	0.0000	0.0000	Tubo de aluminio de 100x15 mm
2	4	0.0000	0.0000	Tubo de aluminio de 20x10 mm
3	4	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm
4	2	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm
5	2	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm
6	2	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm
7	1	0.0000	0.0000	Clavo de aluminio 20x10 mm
8	2	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm
9	2	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm
10	2	0.0000	0.0000	Clavos de aluminio 20x10 mm



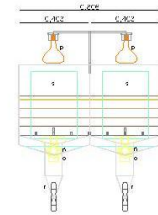
Eras de secado
Vista planta
Escala 1:20



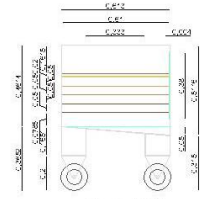
Tanque de EDS
Vista planta
Escala 1:10



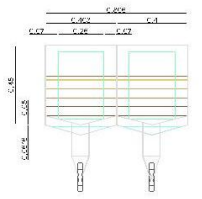
Eras de secado
Vista longitudinal - Corte A-A'
Escala 1:10



Eras de secado
Vista frontal - Corte B-B'
Escala 1:10

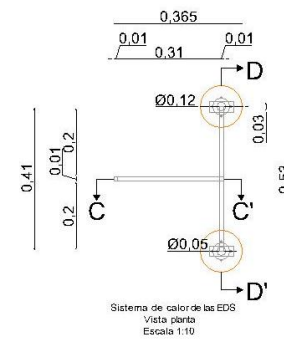
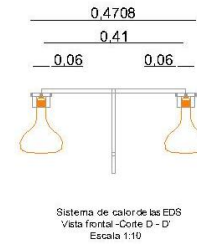
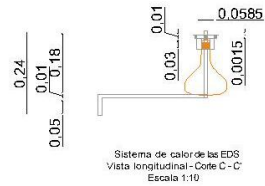
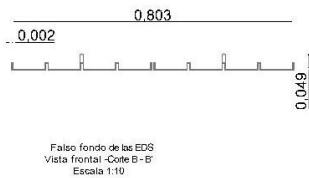
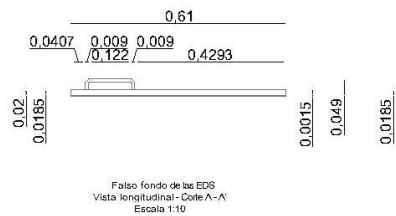
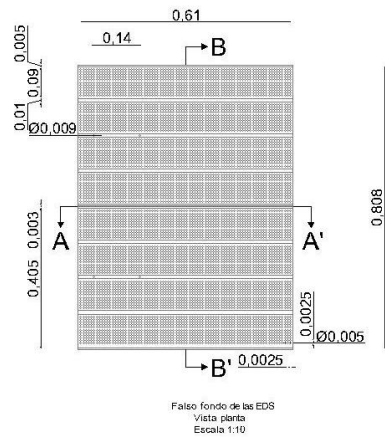


Tanque de EDS
Vista longitudinal - Corte C-C'
Escala 1:10



Tanque de EDS
Vista frontal - Corte D-D'
Escala 1:10

	Facultad de Ciencias Escuela de Ingeniería Química Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental
	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS RESIDUALES DE UNA PÍLORA ESCALA DE LABORATORIO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH (2018)
PLANOS A DETALLE DE LAS ERAS DE SECADO	
DISEÑADORAS - Pérez Jirón, Joan Ponce - Zumbana López, Edison Damian	PÁGINA 3 de 4
SUPERVISORAS - Pérez Jirón, Joan Ponce - Zumbana López, Edison Damian	FECHA Indicadas
APROBADORAS Dr. Gerardo León Chimbalma	FECHA 01.03.2018



 ESPOCH <small>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</small>	Facultad de Ciencias Escuela de Ciencias Químicas Carrera de Ingeniería en Biotecnología Año 2016
	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE Lodos RESIDUALES DE UNA PLANTA ESCALA DE LABORATORIO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH, 2016
TÍTULO DEL PROYECTO PLANOS A DETALLE DE LAS ERAS DE SECADO (FALSO FONDO Y SISTEMA DE CALOR)	
ELABORADO POR - Pérez Jimnez, Juan Pizaro - Zumbana López, Edison Damian	PÁGINA 4 de 4
REVISADO POR - Pérez Jimnez, Juan Pizaro - Zumbana López, Edison Damian	FECHA Indefinida
APROBADO POR Dr. Gerardo León Chimboloma	FECHA 01.03.2016

ANEXO C: Construcción de los equipos constituyentes del sistema de tratamiento.



Fotografía 4. Medición de los materiales.



Fotografía 5. Corte de los materiales.



Fotografía 6. Pulido de los materiales.



Fotografía 7. Soldado de los materiales.



Fotografía 8. Estructura del espesador de lodos por gravedad.

ANEXO D: Implementación del sistema de tratamiento en el Laboratorio de Aire de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.



Fotografía 9. Acondicionamiento del espesador de lodos por gravedad.



Fotografía 10. Medición de volumen del espesador de lodos por gravedad.



Fotografía 11. Colocación del medio filtrante en las eras de secado.



Fotografía 12. Medio filtrante de las eras de secado.



Fotografía 13. Sistema de tratamiento de lodos residuales implementado.

ANEXO E: Toma de muestra de lodo residual de la PTAR “Cunchibamba” para las pruebas experimentales.



Fotografía 14. Recolección de la muestra de lodo residual.



Fotografía 15. Traspase de lodo al contenedor.



Fotografía 16. Sellado de los contenedores con las muestras de lodo recolectadas.

ANEXO F: Análisis de la muestra de lodo residual en laboratorio.



Fotografía 17. Trasvase de lodo a un vaso de precipitación.



Fotografía 18. Medición de volumen de muestra de lodo.



Fotografía 19. Pesaje de la muestra de lodo.



Fotografía 20. Filtración de las muestras de lodo.



Fotografía 21. Sedimentación de las partículas sólidas en los conos imhoff.

ANEXO G: Pruebas experimentales.



Fotografía 22. Traspase de la muestra de lodo a una probeta.



Fotografía 23. Separación de la fase sólida de la muestra de lodo diluido.



Fotografía 24. Medición de la fase sólida de la muestra de lodo diluido.



Fotografía 25. Separación de la fase sólida de la muestra de lodo concentrado.



Fotografía 26. Medición de la fase sólida de la muestra de lodo concentrado.



Fotografía 27. Espesado de la muestra de lodo diluido en el espesador de lodos por gravedad.



Fotografía 28. Espesado de la muestra de lodo concentrado en el espesador de lodos por gravedad.



Fotografía 29. Toma de muestra de lodo espesado.



Fotografía 30. Trasvase de lodo espesado a las eras de secado.



Fotografía 31. Muestra de lodo espesado en las eras de secado.



Fotografía 32. Secado de la muestra espesada de lodo diluido.



Fotografía 33. Secado de la muestra espesada de lodo concentrado.



Fotografía 34. Muestra seca de lodo diluido.



Fotografía 35. Muestra seca de lodo concentrado.

ANEXO H: Encuestas virtuales a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.



Fotografía 36. Explicación del trabajo de investigación a los estudiantes.



Fotografía 37. Encuestas virtuales a los estudiantes.

AENXO I: Práctica de laboratorio en los equipos diseñados con los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.



Fotografía 38. Explicación de la práctica a los estudiantes.