



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
"MANUEL FÉLIX LÓPEZ"**

CARRERA DE MEDIO AMBIENTE

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MEDIO
AMBIENTE**

MODALIDAD:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA
MEDIANTE LOMBRIFILTROS (*Eisenia foetida*) EN AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES.**

AUTORES:

**CASTILLO SÁNCHEZ JONATHAN GUSTAVO
CHIMBO SOLÓRZANO JESSICA ESTEFANIA**

TUTOR:

Q.F. PATRICIO NOLES AGUILAR, M.Sc.

CALCETA, FEBRERO 2021

DERECHOS DE AUTORÍA

JONATHAN GUSTAVO CASTILLO SÁNCHEZ con cédula de ciudadanía 171982744-4, y **JÉSSICA ESTEFANIA CHIMBO SOLÓRZANO**, con cédula de ciudadanía 131459280-7, declaran bajo juramento que el Trabajo de Titulación titulado: **EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE LOMBRIFILTROS (*Eisenia foetida*) EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES** es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración concedemos a favor de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, conservando a mi favor todos los derechos patrimoniales de autor sobre la obra, en conformidad con el Artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación.



JONATHAN G. CASTILLO SÁNCHEZ



JESSICA E. CHIMBO SOLÓRZANO

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Q.F. PATRICIO NOLES AGUILAR, M.Sc certifica haber tutelado el proyecto **EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE LOMBRIFILTROS (*Eisenia foetida*) EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES**, que ha sido desarrollada por **JONATHAN GUSTAVO CASTILLO SÁNCHEZ Y JÉSSICA ESTEFANIA CHIMBO SOLÓRZANO**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

A handwritten signature in purple ink that reads "Patricio Noles" with a stylized flourish at the end.

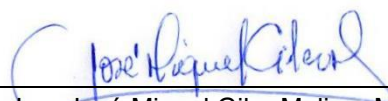
Q.F. Patricio Noles Aguilar, M.Sc.

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el trabajo de titulación **EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE LOMBRIFILTROS (*Eisenia foetida*) EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES**, que ha sido propuesta, desarrollada por **JONATHAN GUSTAVO CASTILLO SÁNCHEZ Y JESSICA ESTEFANIA CHIMBO SOLÓRZANO**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.



Ing. Silvia Lorena Montero Cedeño, M. Sc.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. José Miguel Giler Molina, M.Sc.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. Carlos Delgado Villafuerte, Mg. C.A.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

A Dios por habernos acompañado, guiado y brindado salud durante estos cinco años de estudio. Sin ti nada de esto hubiese sido posible.

A mis padres Luis Castillo y Martha Sánchez por brindarme su apoyo incondicional desde que inicie mis estudios, así como a mis hermanos, Sneijder y Johana por ser un motivo de superación y ejemplo para ellos. todo lo que soy es por ustedes.

Al Sr. Rubén Mera y Lcda. Judith Intriago por abrirme las puertas de su hogar al inicio de mi carrera universitaria y ser como una familia para mí.

A mi familia: mis abuelitos, quienes considero mis segundos padres Osvaldo Sánchez y Luz Bermello, por ser un ejemplo al inculcarme valores y grandes enseñanzas. A mis tíos y tías, Geovanny, Viviana, Maritza, Miguel, Juan Pablo, Matilde, Antonio, Richard, Mary, Polibio, por haber estado atentos y brindarme su ayuda en muchos momentos de mi etapa universitaria.

A mis maestros, por haberme impartido sus valiosos conocimientos durante estos años, a los cuales admiro y respeto por ser grandes profesionales y excelentes personas, destacando al Ing. Julio Loureiro, Ing. Francisco Velásquez, mi tutor Q.F. Patricio Noles y mi gran amigo y profesor Pascual Rosero, el cual se encuentra descansando en la vida eterna y estará siempre en mis recuerdos.

Al Ing. Jorge Teca, Ing. Eudaldo Loor, conocido cariñosamente como “el primo”, Ing. Fabián Peñarrieta, así como al Tlgo. Alfredo Pinargote “Don Mello” por estar siempre prestos a ayudarnos en las actividades de laboratorio y trabajo de campo.

A nuestra querida Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, por ser como mi segundo hogar durante más de cinco años, me brindó valores, conocimientos y la oportunidad de conocer grandes personas, las cuales se convirtieron en amigos verdaderos y en una segunda familia.

Jonathan Gustavo Castillo Sánchez

DEDICATORIA

Este maravilloso logro es dedicado a Dios, ya que es el que siempre me acompaña, me cuida y me guía para tomar decisiones correctas en mi vida.

A mis padres, hermanos y a mi familia por su apoyo incondicional durante todo este tiempo lleno de esfuerzo y sacrificio. Sin todos ustedes, no lo hubiese logrado.

A mis queridos amigos y amigas, los cuales he conocido en esta maravillosa tierra, ya que de una u otra forma han aportado con un granito de arena en la realización de la presente investigación.

Por último, dedico esta tesis a Calceta “La Sin Par” por haberse convertido en mi segunda tierra, mi segundo hogar y haberme dado la oportunidad de crecer profesional y personalmente durante estos últimos años. Me enamoré de ti Calcetita.

Jonathan Gustavo Castillo Sánchez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su infinita bondad, y por haber estado conmigo en los momentos que más lo necesitaba, por darme salud, responsabilidad y sabiduría, por haberme permitido culminar uno de mis propósitos de vida, y porque tengo la certeza y el gozo de que siempre va a estar conmigo.

A mi madre por su comprensión, apoyo incondicional y estímulo constante a lo largo de mis estudios, pues ha sido quien me ha dado fortaleza para continuar sin decaer.

A Gustavo “El abogado” por haber sido un excelente compañero de tesis y amigo, por tenerme la paciencia necesaria, por compartir sus experiencias y la oportunidad de trabajar juntos en el desarrollo de esta tesis.

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López” por abrir sus puertas, a sus autoridades y profesores, por compartir sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra carrera profesional, de manera especial.

Finalmente agradezco a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en este largo camino de formación, siempre los llevo en mi corazón.

Jessica Estefanía Chimbo Solórzano

DEDICATORIA

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy.

A mi madre quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias, los quiero mucho y nunca los olvidaré.

Jessica Estefanía Chimbo Solórzano

CONTENIDO

DERECHOS DE AUTORÍA	ii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
CONTENIDO.....	ix
CONTENIDO DE TABLAS	xiii
CONTENIDO DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Aguas residuales domésticas	4
2.1.1. Materia orgánica en aguas residuales domésticas.....	4
2.2. Lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>).....	5

2.3. Lombrifiltro	6
2.4. Descripción de las capas del lombrifiltro.....	7
2.4.1. Material filtrante vermicomposta.....	8
2.4.2. Carbón activado	8
2.4.3. Grava	8
2.4.4. Piedra.....	9
2.5. Tasa de riego.....	9
2.6. Tiempo de retención hidráulico.....	10
2.7. Carga hidráulica.....	10
2.8. Eficiencia de remoción de materia orgánica	11
2.9. Análisis costo/beneficio.....	11
2.10. Determinación de carga orgánica	12
2.10.1. DBO	12
2.10.2. DQO	12
2.10.3. Sólidos totales.....	12
2.10.4. Sólidos suspendidos totales.....	12
2.10.5. pH.....	13
2.10.6. Temperatura.....	13
2.11. Mantenimiento de lombrifiltros	13
2.11.1. Condiciones ambientales para el desarrollo de <i>Eisenia foetida</i> en lombrifiltros.....	14
2.12. Remoción de materia orgánica en aguas residuales domésticas con Sistema Tohá	15
2.13. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013.....	17

2.14. Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes dl Recurso Agua	18
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO	19
3.1. Ubicación.....	19
3.2. Duración del trabajo.....	20
3.3. Factor en estudio	20
3.4. Tratamientos.....	20
3.5. Diseño experimental	20
3.6. Unidad experimental	20
3.7. Variables a medir	21
3.7.1. Variable independiente.....	21
3.7.2. Variable dependiente	21
3.8. Cuadro de variantes	21
3.9. Métodos.....	22
3.10. Análisis estadístico	22
3.11. Manejo de experimento	22
3.11.1. Fase I. Caracterización de la concentración de agua residual y el volumen a nivel doméstico en una zona rural.	22
3.11.2. Fase II. Determinación de la eficiencia del lombrifiltro compuesto por <i>Eisenia foetida</i>	25
3.11.3. Fase III. Cálculo del costo beneficio del lombrifiltro a base de lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>).	28
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. Caracterización de la concentración de agua residual y el volumen a nivel doméstico en una zona rural.....	29

4.2. Determinación de la eficiencia del lombrifiltro compuesto por <i>eisenia foetida</i>	30
4.2.1. Diseño del lombrifiltro	30
4.2.2. Adaptación de <i>Eisenia foetida</i> al agua residual doméstica	32
4.2.3. Caudal y tiempo de retención hidráulico	33
4.2.4. Determinación de la eficiencia (porcentaje de remoción).....	34
4.3. Cálculo del costo beneficio del lombrifiltro a base de lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>).....	42
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Recomendaciones	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	54

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 2. 1. Técnicas Generales para la Conservación de Muestras - Análisis Físico-Químico	17
Tabla 2. 2. Límites de Descarga a un Cuerpo de Agua Dulce	18
Tabla 3. 1. Coordenadas de la Zona de Muestreo y Laboratorio de la ESPAM MFL	19
Tabla 3. 2. Diseño Experimental.....	20
Tabla 3. 3. Cuadro de Variantes.....	21
Tabla 3. 4. Técnicas de los Parámetros a Analizar	25
Tabla 4. 1. Características Fisicoquímicas del Agua Residual Doméstica Previa a Tratamiento....	29
Tabla 4. 2. Dimensiones de Material Filtrante en Cada Capa de la Estructura	31
Tabla 4. 3. Tiempo de Retención Hidráulico de Acuerdo a los Caudales Obtenidos.....	33
Tabla 4. 4. Análisis de Varianza (ANOVA) para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	35
Tabla 4. 5. Análisis de Varianza (ANOVA) para Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	37
Tabla 4. 6. Prueba de Tukey para Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	38
Tabla 4. 7. Análisis de Varianza (ANOVA) para Sólidos Totales (ST).....	39
Tabla 4. 8. Prueba de Tukey para Sólidos Totales (ST).....	39
Tabla 4. 9. Costo de Producción del Lombrifiltro	43

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 2. 1. Subdivisión de Materia Orgánica en las Aguas Residuales.....	5
Figura 2. 2. Lombrifiltro Modelo Sistema Tohá	7
Figura 3.1. Mapa de Ubicación de Implementación del Proyecto.....	19
Figura 4. 1. Diseño del Lombrifiltro.....	31
Figura 4. 2. Adaptación de Eisenia foetida al Agua Residual Doméstica Durante 10 días	32
Figura 4. 3. <i>Porcentaje de Remoción de DBO₅</i>	35
Figura 4. 4. Porcentaje de Remoción de DQO	36
Figura 4. 5. Porcentaje de Remoción de SST	38
Figura 4. 6. Porcentaje de remoción de ST	40
Figura 4. 7. Comportamiento del pH del Agua Residual Doméstica Tratada	41
Figura 4. 8. Comportamiento de la Temperatura del Agua Residual Doméstica Tratada	42

RESUMEN

El inadecuado manejo de las aguas residuales domésticas en zonas rurales, cuyo vertimiento a cuerpos hídricos sin previo tratamiento, constituye un gran problema de contaminación ambiental, así como un riesgo para la salud pública. El propósito del presente estudio fue evaluar la eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros en aguas residuales domésticas para zonas rurales. En condiciones experimentales, se diseñó el lombrifiltro utilizando como base teórica el sistema de tratamiento Tohá, creado por el Dr. José Tohá, el cual estuvo conformado por cuatro estratos: aserrín + *Eisenia foetida*, carbón activado, grava y piedras de río. El experimento se realizó bajo un DCA utilizando el software InfoStat, donde se plantearon tres tratamientos con tres repeticiones cada uno, generando así 9 unidades experimentales. Se evaluó la concentración de materia orgánica y volumen del agua residual doméstica de una vivienda, obteniendo un caudal estimado de $5,18 \text{ m}^3/\text{día}$ y elevadas concentraciones de DBO₅, DQO, SST y ST. El análisis estadístico permitió constatar que no existen diferencias significativas en la remoción de materia orgánica ($p > 0,05$). Sin embargo, T₁ alcanzó los mayores porcentajes de eficiencia con un flujo volumétrico de $1,8 \times 10^{-2} \text{ l/s}$ y TRH de 0,92 h obteniendo 52,25 % para DBO₅ y DQO, 66,74 % de SST y 52,91 % de ST, por lo que se acepta la hipótesis planteada. Por último, mediante un análisis costo/beneficio se determinó que la implementación de lombrifiltros es de bajo costo de inversión, afirmando así su aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales.

Palabras Claves: Lombrifiltro, *Eisenia foetida*, aguas residuales domésticas, caudal, eficiencia.

ABSTRACT

The inadequate management of domestic wastewater in rural areas, whose discharge to water bodies without prior treatment, is a major problem of environmental pollution, as well as a risk to public health. The purpose of this study was to evaluate the efficiency of organic matter removal by earthworms in domestic wastewater for rural areas. Under experimental conditions, the wormfilter was designed using as a theoretical basis the Tohá treatment system, created by Dr. José Tohá, which consisted of four strata: sawdaught + *Eisenia foetida*, activated charcoal, gravel and river stones. The experiment was carried out under an ACD using the InfoStat software, where three treatments with three repetitions each were proposed, thus generating 9 experimental units. The concentration of organic matter and volume of domestic wastewater in a home was evaluated, obtaining an estimated flow rate of $5,18 \text{ m}^3/\text{day}$ and high concentrations of BOD₅, COD, TSS and TS. Statistical analysis found that there are no significant differences in the removal of organic matter ($p > 0,05$). However, T₁ achieved the highest efficiency percentages with a volumetric flow of $1,8 \times 10^{-2} \text{ l/s}$ and TRH of 0,92 h obtaining 52,25 % for BOD₅ and COD, 66,74 % TSS and 52,91 % TS, for which the hypothesis is accepted. Finally, a cost-benefit analysis determined that the implementation of wormfilters is low investment cost, thus affirming their application in the treatment of domestic wastewater in rural areas.

Keywords: Worm filter, *Eisenia foetida*, domestic wastewater, flow, efficiency.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua es uno de los recursos naturales que más influye en el crecimiento de cualquier país; es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta imprescindible para el desarrollo de la vida. Al estar contaminada por diversos medios, incluidos los acuíferos, su disponibilidad está disminuyendo, lo que representa un desequilibrio ambiental, social y económico (Romero et al., 2009).

La gran inversión requerida para instalar un sistema de tratamiento de aguas residuales convencional, el alto consumo de energía y los costos de mantenimiento y operación son las principales razones por las que esta alternativa no tiene éxito en América Latina (De Anda, 2017). Por esta razón, Fernández *et al.*, (2008) afirman que actualmente es elevado el número de zonas rurales sin drenaje que vierten sus aguas residuales al suelo, barrancas o arroyos, ocasionando alteraciones en la salud y contaminación.

En Ecuador, de acuerdo con datos obtenidos de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) (2012), el segundo uso consuntivo del agua que predomina es el doméstico (13%), superado por el uso agrícola, pues representa el 80% del caudal utilizado. Muchas familias de comunidades rurales evacúan sus aguas residuales directamente a cuerpos de agua o las descargan en pozos sépticos sin que reciban tratamiento alguno puesto que no cuentan con sistemas de tratamiento debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal idóneo que se necesita para llevar a cabo la implementación de este tipo de sistemas (Reyes, 2016).

Por consiguiente, estas aguas suponen un grave problema, debido a que son utilizadas por pequeños grupos de productores en diferentes actividades, especialmente en el sector agrícola, provocando así el deterioro del medio ambiente y afectando la salud de la población por la concentración de contaminantes que estas contiene (Tejada, Chura y Apaza, 2018).

De esta manera, surge la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de tratamiento no convencional que puedan utilizarse en comunidades rurales y que sean de fácil operación sin necesidad de contar con personal técnico capacitado, accesibles, de bajo costo y que no perjudiquen al entorno natural (Parra y Chiang, 2013).

Es por ello que los autores de esta investigación plantean la siguiente interrogante:

¿Cuál sería la eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante la implementación de un lombrifiltro con *Eisenia foetida* para aguas residuales domésticas en zonas rurales?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de las aguas residuales domésticas es una prioridad a escala mundial, ya que es importante poseer una cantidad de agua suficiente y de buena calidad, permitiendo así una mejor calidad de vida, del ambiente y de la salud (Romero *et al.*, 2009). Por tal motivo, hay una necesidad urgente de emplear alternativas innovadoras, eficaces y económicas para el tratamiento de estas aguas (Arango, 2005).

El sistema Tohá que utiliza lombrices de la especie *Eisenia foetida* es una alternativa ecológica que tiene como objetivo depurar las aguas residuales domésticas e industriales y eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos que se encuentran en ellas. Como resultado del tratamiento se obtiene el agua debidamente tratada y por consiguiente un residuo sólido o lodo que debe ser dispuesto de una manera segura para evitar malos olores y contaminación, contribuyendo a la recuperación del recurso y a disminuir los impactos en la salud y el ambiente (Ramón, León y Castillo, 2015).

Esta investigación se desarrolló en el marco de los Objetivos 1 y 3 del Plan Nacional para el Buen Vivir, los cuales garantizan una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas y asegura los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones (SENPLADES, 2017).

Debido a que existe una escasez de métodos naturales implementados como alternativas para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales, la presente investigación busca diseñar e implementar un sistema de tratamiento ecológico e innovador basado en lombrifiltros con *Eisenia foetida* que requieran una baja inversión, sean eficientes y amigables con el medio ambiente.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la concentración de agua residual y el volumen a nivel doméstico en una zona rural.
- Determinar la eficiencia del lombrifiltro compuesto por *Eisenia foetida*.
- Calcular el costo beneficio del lombrifiltro a base de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*).

1.4. HIPÓTESIS

El lombrifiltro a partir de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) permitirá una eficiencia significativa en la remoción de carga orgánica en aguas residuales domésticas procedentes de zonas rurales.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

El agua natural más aportes compone el agua residual (AR). Por tanto, se denomina por ello como AR aquella que procede de haber utilizado un agua natural o de la red para fines específicos. Las AR urbanas incluyen una mezcla de AR o AR industrial o escorrentía de agua de lluvia. Las AR domesticas incluyen las AR procedentes de zonas de vivienda y servicios generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas (García y Gonzales, 2000).

La composición exacta de este tipo de agua depende de la región y cultura, las diferencias nutricionales, tipos de productos de limpieza, consumo de agua potable, etc. Es imposible estandarizar la calidad de las aguas residuales domésticas a tratar en cualquier ciudad, por lo que no es posible tener una fórmula o modelo de tratamiento único, y es necesario implementar un diseño especial para cada uno (Robles y López, 2017).

2.1.1. MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Tomando como referencia la investigación realizada por García y González (2000), la materia orgánica de las aguas residuales domésticas está compuesta por proteínas, aceite, carbohidratos, urea y moléculas orgánicas sintéticas, incluidos microcontaminantes. De manera similar, muchos microorganismos patógenos también ingresan a estas aguas residuales.

La materia orgánica de las aguas residuales se puede dividir en varias categorías (Figura 2.1), la primera categoría importante se basa en la biodegradabilidad. La materia orgánica no biodegradable es biológicamente inerte, puede pasar por el sistema de tratamiento biológico sin modificación y se puede dividir en dos categorías según su estado físico: soluble y particulada. La materia orgánica biodegradable a su vez se puede dividir en dos categorías: biodegradación rápida y biodegradación lenta (Osorio *et al.*, 2010).

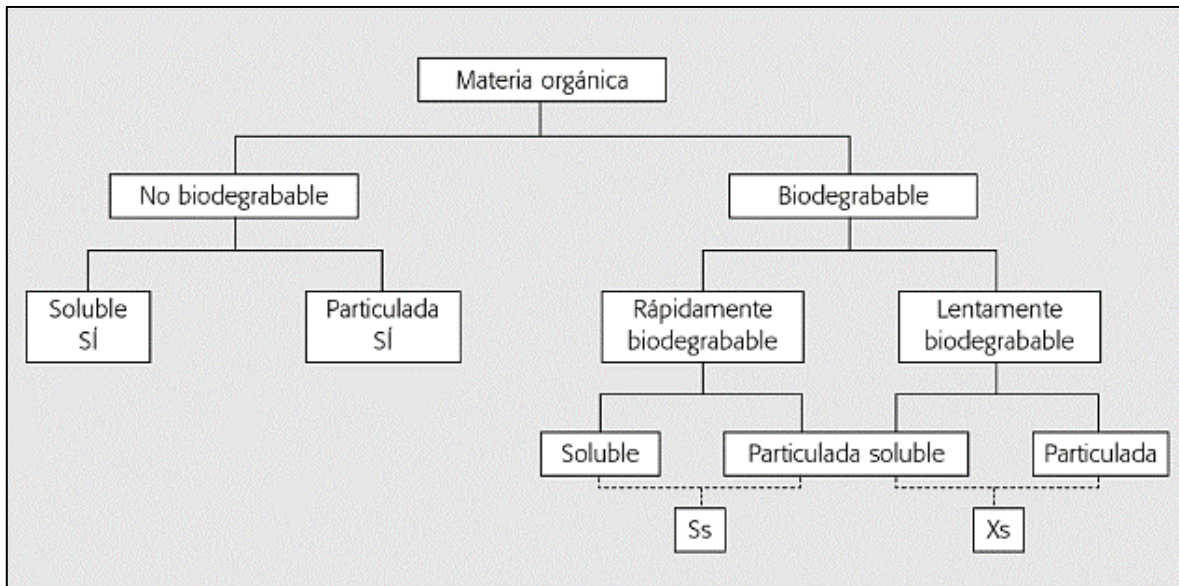


Figura 2. 1. Subdivisión de Materia Orgánica en las Aguas Residuales

Fuente: Osorio *et al.* (2010)

De esta manera, Mejía *et al.* (2017) mencionan que el tratamiento biológico es una opción de depuración de aguas residuales domésticas, que se basa en la capacidad de los microorganismos para metabolizar y transformar la materia orgánica en suspensión y disuelta, en tejido celular nuevo y diferentes gases. Los mismos autores señalan que el oxígeno juega un papel primordial en el tratamiento biológico de las aguas residuales, porque la falta o presencia del mismo determina el tipo de microorganismos responsables de degradar y eliminar la materia orgánica presente en el agua.

Asimismo, Lozada *et al.* (2019) acotan que entre los sistemas utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas está la lumbrifiltración (vermifiltración) el cual consiste en la introducción de lombrices en materiales adecuados para descomponer la materia orgánica.

2.2. LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*)

Cáceres *et al.* (2018) afirman que la lombriz roja de California es actualmente la especie más cultivada en el mundo, no solo porque está mejor adaptada al cautiverio sin escapar, sino también por su "vitalidad, tolerancia a factores ambientales (humedad, temperatura y pH), potencial reproductivo y capacidad de

apiñamiento». La temperatura óptima para su desarrollo fluctúa entre 15 y 25 °C, y el valor de pH ideal en el sustrato desarrollado en el mismo debe fluctuar entre 6,0 y 8,0. Este anélido se alimenta de todo tipo de materia orgánica, sea de origen animal o vegetal (poca selectividad). Además, no transmite enfermedades, debido a que los organismos patógenos (hongos, bacterias y protozoos) forman parte de su alimento y lo destruyen durante la digestión, convirtiéndolos en componentes de sus excreciones.

La lombriz de tierra mejora la estructura del suelo, promueve la descomposición de la materia orgánica y mejora el ciclo de nutrientes. También juega un papel clave en la evaluación de riesgos eco toxicológicos terrestres (Zapata *et al.*, 2016).

2.3. LOMBRIFILTRO

El "Sistema Tohá" (también conocido como Lombrifiltro o "Biofiltro Aeróbico Dinámico") es un método de tratamiento de aguas residuales desarrollado en el Laboratorio de Biofísica de la Universidad de Chile por el profesor José Tohá Castella y su equipo colaborador. Es un filtro de goteo compuesto por diferentes capas filtrantes y lombrices. (Figura. 2.1) (Lozada *et al.*, 2019). Por su parte, Hernández (2005), menciona que la capa superior tiene una alta cantidad de lombrices, la especie que más se emplea es la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) junto con comunidades de microorganismos responsables de la degeneración de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

Una de las ventajas de este sistema de tratamiento es que casi todos los sólidos orgánicos se pueden degradar sin generar lodos inestables, y el lecho filtrante no se bloqueará, por lo que no será impermeable. Esta característica se debe principalmente a la acción de las lombrices, que mediante un movimiento incesante forman un canal para asegurar que el filtro siempre tenga una alta permeabilidad. La materia orgánica sólida presente en las aguas residuales llena o recubre otros filtros y es digerida por las lombrices (Ramón *et al.*, 2015).

Asimismo, Salazar (2005) señala que la materia orgánica retenida en el medio filtrante es removida por una gran cantidad de lombrices y microorganismos adheridos al medio, estos microorganismos y gusanos son los responsables de degradar la materia orgánica utilizada como alimento, energía y fuentes alimenticias. Después de que las lombrices digieren la materia orgánica, producen el llamado "humus" a través de sus secreciones, que pueden extraerse de vez en cuando y utilizarse como abono orgánico para el suelo.

Utilizando *Eisenia foetida* como tecnología de filtración en el tratamiento de aguas residuales, se han llevado a cabo diversas investigaciones y pruebas de aplicaciones en el extranjero. Respecto a esta tecnología, destacan su eficiencia, bajo costo y características amigables con el medio ambiente (Brack, 2009).

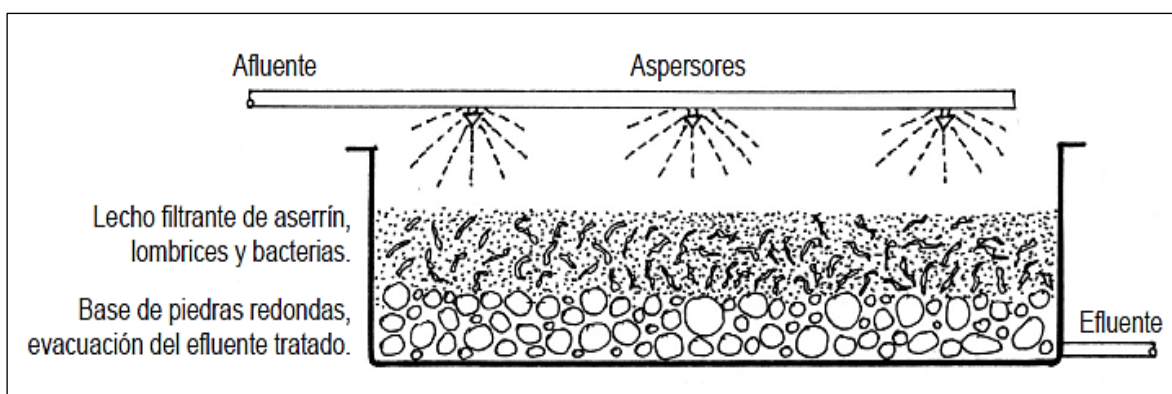


Figura 2. 2. Lombrifiltro Modelo Sistema Tohá
Fuente: Hernández (2005)

2.4. DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS DEL LOMBRIFILTRO

Arango (2003) indica que el agua residual doméstica se riega uniformemente en la superficie de la capa superior del lombrifiltro; las lombrices y microorganismos que habitan en esta capa digieren la materia orgánica que ha quedado retenida mientras que el agua continúa traspasando los diferentes lechos filtrantes hasta llegar a la parte inferior con un aspecto mucho más claro. La composición del reactor de filtro está compuesta por varias capas de diferentes materiales filtrantes. Su función principal es detener los contaminantes en el agua residual y un estrato de soporte que sirve como asiento del todo el sistema y ayudar a descargar el agua tratada que

va descendiendo por gravedad por gravedad. De agua tratada y por capilaridad (Gallegos, 2019).

2.4.1. MATERIAL FILTRANTE VERMICOMPOSTA

La primera capa está compuesta de aserrín o viruta (residuos de madera) mezcladas con lombrices. De acuerdo con el caudal y la cantidad de agua a tratar, el espesor recomendado es de 25 cm para obtener resultados efectivos. Además, el aserrín es fácil de descomponer y cumple la función de lecho filtrante de soporte, el cual retiene sólidos y otros contaminantes disueltos en el agua (Gallegos, 2019). Además, su principal finalidad es servir de alimento a las lombrices cuando la carga contaminante de los afluentes es insuficiente. Mayormente se utiliza el aserrín de madera blanca ya que el aserrín de la madera rojiza contiene taninos que son tóxicos para las lombrices. Dado que este material de soporte se convierte en humus de lombriz, se cambiará a intervalos regulares durante el proceso de mantenimiento (Saboya, 2018).

2.4.2. CARBÓN ACTIVADO

Según Filippín *et al.*, (2017), el carbón activado es una forma sólida de carbono con una microestructura desorganizada no gráfica que le otorga una estructura de superficie abierta, razón de su alta capacidad de adsorción. Estudios realizados por Rojas *et al.*, (2017) demuestran que el carbón activado es una alternativa eficiente como medio filtrante que aumenta la remoción en filtros rápidos.

2.4.3. GRAVA

Las partículas de roca entre 2 y 64 mm de tamaño se denominan grava, aunque no existe un límite superior único. Estas pueden ser naturales o producidas por el hombre. En el desgaste natural causado por el movimiento de los lechos del río, se les llama guijarros. Hay algunas gravas naturales que no son rocas grandes. Estos agregados son partículas granulares de piedra de tamaño variable. Este material se origina al romper diferentes rocas de la corteza terrestre por medios naturales o artificiales (Rodríguez, 2017). La grava sirve de soporte al medio filtrante, para que

no se pierda el drenaje durante el proceso de filtración y el agua de lavado se distribuya uniformemente para evitar la formación de chorros. Debe colocarse manualmente al construir un lombrifiltro (Rojas *et al.*, (2017).

2.4.4. PIEDRA

Las piedras se extraen de las orillas del río y son de origen natural, su forma la toma por la erosión producto del paso constante del agua, haciendo que su superficie sea lisa y notablemente redonda. En el tratamiento del agua, se utilizan como estratos filtrantes. Al tener una amplia superficie de contacto, debido a la acumulación de microorganismos producirá una biopelícula, este se adherirá a la superficie con mayor firmeza a medida que las bacterias se multipliquen (Lima, 2016).

2.5. TASA DE RIEGO

El diseño del filtro de lombrices se basa en lograr un balance de masa que tenga en cuenta los siguientes factores: la cantidad de lombrices que pueden coexistir por unidad de superficie, la cantidad de materia orgánica que pueden digerir y la tasa máxima de riego que puede soportar el lecho para evitar la muerte de lombrices por hipoxia, que equivale a $1\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ (Salazar, 2005). Además, ya comprendido el caudal de diseño (Q), y suponiendo una tasa de riego (T_{riego}) puede determinarse el área requerida (A) para el tratamiento donde:

$$T_{\text{riego}} = \frac{Q}{A} \leq 1\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d} \quad [2.1]$$

Además, el mismo autor también menciona que debido a que la materia orgánica de las aguas residuales se convierte en masa corporal de las lombrices y en humus, en ocasiones se extrae el exceso de humus para reconstruir la capa original del biofiltro y utilizarlo como excelente fertilizante agrícola, incluso si se usa en forma excesiva, no dañará ni quemará plantas como los fertilizantes químicos.

2.6. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

El tiempo de retención hidráulica es el tiempo de permanencia del agua residual en el filtro. La duración de la fase de reacción afecta el desempeño del proceso, pues se ha encontrado que cuanto mayor es el tiempo de reacción, mayor es la reducción de orgánicos, razón por la cual se suelen utilizar tiempos de reacción más largos (Coronel, 2015).

En concordancia, Osorio y Rodríguez (2014) mencionan que el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) se refiere al tiempo promedio que una determinada cantidad de agua residual permanece en el tanque desde la entrada hasta la salida. El TRH en el reactor es muy importante porque define el tiempo promedio para procesar el sustrato orgánico. La TRH se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad [2.2]$$

Donde:

V: Volumen

Q: Caudal

2.7. CARGA HIDRÁULICA

La carga hidráulica representa la cantidad (volumen) de aguas residuales aplicadas al filtro biológico diariamente, y la carga orgánica representa la carga contaminante de las aguas residuales durante el tiempo de retención hidráulica (Osorio & Rodríguez, 2014).

Según Jiménez (2001), la carga hidráulica es un parámetro de diseño que corresponde a la velocidad de sedimentación final de las partículas 100% removidas, definida como:

$$q_o = \frac{Q}{A} \quad [2.3]$$

Donde:

q_o : carga hidráulica. $m^3/m^2 \cdot h$ ó m/h

A: área del sedimentador, m^2

Q: flujo que entra al sedimentador, m^3/h

2.8. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

De acuerdo con Reina (2015), determinar la eficiencia de la materia orgánica es la base fundamental para la aceptación del sistema de tratamiento de aguas residuales. Se establece como el porcentaje de materia orgánica detenida en el reactor biológico, como biomasa formada, por lo que dependiendo de la calidad del reactor se pueden reducir las aguas residuales o efluentes o se puede eliminar su carga orgánica. Según Caicedo (2017), su ecuación de obtención se expresa como:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(\text{Concentración inicial}) - (\text{Concentración final})}{(\text{Concentración inicial})} * 100 \quad [2.4]$$

2.9. ANÁLISIS COSTO/BENEFICIO

La característica más destacada del análisis de costo-beneficio es tratar de cuantificar los beneficios y costos en términos monetarios tanto como sea posible. Sin embargo, este tipo de análisis rara vez logra el método ideal para medir todos los beneficios y costos en moneda, por lo que se realiza un análisis de costo / beneficio para comparar la viabilidad económica asociada con la implementación de diferentes propuestas. Comienza con la premisa de que el proyecto solo se puede implementar si todos los beneficios exceden el costo total. El beneficio neto de cada opción es la diferencia entre el beneficio (ingreso) y el costo (egreso) (Martínez, 2014).

2.10. DETERMINACIÓN DE CARGA ORGÁNICA

2.10.1. DBO

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se utiliza como una medida de la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica biodegradable en una muestra de agua debido a la oxidación aeróbica. Es uno de los indicadores más importantes para medir la contaminación de las aguas residuales. Generalmente, en las aguas residuales domésticas, su contenido está entre 100 y 350 ppm (Raffo & Ruiz, 2014).

2.10.2. DQO

Mide la cantidad de materia orgánica en el agua mediante la determinación del oxígeno requerido para oxidarla, pero en este caso, proporcionado por un oxidante químico (como el permanganato de potasio o el dicromato de potasio). Esta técnica es de gran utilidad cuando las aguas residuales contienen sustancias tóxicas, porque puede ser la única forma de determinar la carga orgánica. La oxidación química es más acelerada que la oxidación biológica. Para las aguas residuales domésticas, casi toda la demanda de oxígeno proviene de materia orgánica que contiene carbono (Raffo & Ruiz, 2014).

2.10.3. SÓLIDOS TOTALES

Es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de la muestra y su consecutivo secado en una estufa a temperatura definida. Los sólidos totales están conformados por sólidos suspendidos totales, es decir, la porción de sólidos totales retenida por un filtro, y sólidos disueltos totales, o sea la fracción que atraviesa el filtro (Chacón, 2017).

2.10.4. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Argandoña y Macías (2013) mencionan que los sólidos en suspensión son principalmente de naturaleza orgánica. Consisten en algunos de los materiales más

desagradables contenidos en las aguas residuales. La mayoría de los sólidos en suspensión son desechos humanos, desechos de alimentos, papel, trapos y células biológicas, que forman una gran cantidad de sólidos en suspensión en el agua.

2.10.5. pH

Este parámetro determina el número de iones de hidrógeno presentes en el agua, que va desde 0 cuando es muy ácida hasta 14 cuando es alcalina y 7 cuando el pH es neutro. El pH es importante para la reproducción de microorganismos (Coronel, 2015).

2.10.6. TEMPERATURA

La temperatura es un indicador muy útil a la hora de desarrollar diferentes fenómenos. En el caso de las aguas residuales, cuando la temperatura aumenta, la solubilidad del oxígeno disminuye, lo que resulta en un mayor desgaste del oxígeno disuelto. Suele ser superior a la del agua potable, por el aporte de agua caliente para limpieza y tareas del hogar. El rango de temperatura oscila entre 10°C a 21°C, con una media de unos 15°C (Huiza & Ordoñez, 2018).

2.11. MANTENIMIENTO DE LOMBRIFILTROS

Según Arango (2003), para que el lombrifiltro funcione correctamente debe estar saturado, en el cual el agua residual debe ser regada de manera uniforme para que las lombrices puedan habitar completamente toda el área del biofiltro, para que puedan tener alimento y humedad óptimos para su metabolismo; de lo contrario, la humedad excesiva en el sistema puede ocasionar dificultades, pues si la saturación es demasiado alta no se puede garantizar la supervivencia de las lombrices, pues la oxidación fallará (Casas, 2009). Asimismo, el alimento también debe estar en estado de saturación y se debe evitar el estancamiento de agua, ya que si esto sucede la lombriz no se comporta bien ni realiza un trabajo adecuado, por el contrario, puede provocar la muerte de estas y hacer que pierdan la homogeneidad

del sistema. Esta saturación permanente se logra mediante la descarga de aguas residuales a tasas controladas (Pérez, 2010).

Por otro lado, Salazar (2005) señala que se debe realizar constante movimiento de la mezcla de viruta con el lecho filtrante para mejorar la permeabilidad y evitar la acumulación de agua, se recomienda realizar esta operación una vez a la semana según la cantidad de agua a tratar, pero si es necesario, se debe aumentar la frecuencia para un mejor tratamiento.

Finalmente, para un buen funcionamiento, el lecho debe ser desyerbado cuando se detecte el crecimiento de algún tipo de planta, además de la limpieza regular de aspersores para asegurar un riego superficial uniforme (Madera *et al.*, 2005).

2.11.1. CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESARROLLO DE *Eisenia foetida* EN LOMBRIFILTROS

- **Humedad:** Las condiciones más favorables para la producción y reproducción de lombrices se dan entre el 70% y el 80% de humedad. La humedad inferior al 70% es una condición desfavorable, por otro lado, la humedad inferior al 55% es fatal para las lombrices. A pesar de lo anterior, si las condiciones ambientales no son óptimas, las lombrices tienen la capacidad de adaptarse para optimizar el uso del medio (Paico, 2017).

- **Temperatura:** Las condiciones ideales para el hábitat de las lombrices es que la temperatura fluctúe entre 15°C y 24°C, y la temperatura óptima debe ser lo más cercana posible a su propia temperatura (alrededor de 20°C). Si la temperatura desciende por debajo de los 15°C, las lombrices entran en un período de latencia, reduciendo así su actividad. Dejan de multiplicarse, crecer y producir humus. Además, dado que el capullo (huevo) no eclosionará y el embrión pasa más tiempo bloqueándose, no extenderá el ciclo evolutivo hasta que aparezcan condiciones ambientales favorables (Paico, 2017).

- **pH:** La lombriz roja californiana crecen correctamente en hábitats con un pH entre 6.5 y 7.5. Además, acepta sustratos con un pH de 4,5 a 8,5. Fuera de este rango,

la lombriz entra en la fase latente. Con un pH ácido en el sustrato (<7) desarrolla una plaga llamada Planaria (Paico, 2017).

- **Riego:** Además de permitir ajustar el control de flujo a diferentes niveles, también debe haber un buen sistema de aspersores que promueva un riego fino y uniforme de la superficie del lombrifiltro (Gallegos, 2019).

- **Aireación:** Las lombrices aumentan la aireación y la conductividad hidráulica en el biofiltro. Cuando las lombrices se mueven, las partículas de arcilla se granulan, imposibilitando su compactación. Esta transformación física se lleva a cabo mezclando, triturando y moviendo las partículas para mejorar Condiciones aeróbicas en el medio ambiente. Los pequeños canales creados por la excavación de las lombrices facilitan la circulación de oxígeno en el ambiente y la ventilación del sistema, permitiendo así la degradación en condiciones aeróbicas y evitando la producción de gases olorosos desagradables (Gallegos, 2019).

2.12. REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS CON SISTEMA TOHÁ

Se ha demostrado en diferentes estudios que el sistema Tohá que utiliza lombrices es muy eficaz para eliminar la materia orgánica de las aguas residuales. Por ejemplo, en la investigación realizada por Coronel (2015), se caracterizó mediante un análisis físico-químico de las aguas residuales antes y después del tratamiento con el lombrifiltro, en el cual se obtuvo una mayor tasa de remoción de DBO₅ en el primer tratamiento, por lo que se analizó el agua cruda DQO 472 mg/l, DBO₅ 448 mg/l y sólidos totales disueltos 810 mg/l. A su vez, el agua tratada dio como resultado una DQO 228 mg/L, DBO₅ 70 mg/l y el total de sólidos disueltos es 624 mg/l, por lo que las tasas de remoción fueron de 51,69%, DBO₅ es 84,38% y 22,96%, respectivamente.

Salazar (2005) en su estudio mostró que el uso del biofiltro a base de lombrices tiene un impacto positivo en la calidad de las aguas que se vierten a los cuerpos de

agua o al subsuelo, debido a que este tratamiento demostró ser eficaz para eliminar microorganismos patógenos y carga orgánica con reducciones superiores al 90%.

En China, Xing *et al.* (2010) realizaron un estudio para determinar la relación entre el crecimiento, la reproducción y la actividad enzimática de las lombrices en Shanghai y la eficiencia del tratamiento de aguas residuales por un período de 30 días. El perfil del biofiltro de *Eisenia foetida* está compuesto por cuarzo, arena y cerámica. Los resultados de remoción fueron igualmente buenos, DQO (47,3-64,7%), DBO₅ (54,78-66,36%) y sólidos suspendidos totales (57,18-77,90%), por lo que los autores creen que esta tecnología se puede comparar con otras tecnologías de tratamiento que requieren más espacio (como humedales o lagunas de estabilización) que incluso son aún más eficientes. El estudio también ha demostrado que el aumento de la carga hidráulica conduce a una disminución general de la eficiencia del tratamiento. Y las lombrices más grandes favorecen la emoción porque su actividad enzimática es responsable de la eliminación de DQO y DBO₅.

En un estudio realizado por Cáceres *et al.* (2018), se evaluó la eficiencia de la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Moquegua. Para ello se tomó una muestra representativa de aguas residuales domésticas (afluente) y se analizaron parámetros físicos (temperatura y STS), químicas (pH y DBO₅) y microbiológicos (bacterias coliformes termorresistentes) para determinar su estado inicial. En base a dos tasas de riego, los dos tratamientos de purificación se evaluaron utilizando lombrices rojas californianas, teniendo en cuenta un grupo de control. A pesar de mostrar efectos similares, tuvo un mejor efecto sobre A₂ determinándose que es el más efectivo, con una reducción promedio de 1,40 °C y 55,56% de ST, 99,86% de coliformes termorresistentes y un pH final promedio de 8,23.

Los autores mencionados señalaron que no existe una cantidad exacta de lombrices a utilizar en el sistema de filtración, pero en la mayoría de los estudios se utilizó de 1 a 2 kg de *Eisenia foetida* en un área de 0,25 metros cuadrados.

2.13. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2169:2013

La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013 es la encargada de establecer a nivel nacional las técnicas, así como las precauciones necesarias que se deben tomar para conservar y transportar todo tipo de muestras de agua incluyendo aquellas para análisis biológicos, pero no análisis microbiológicos. Principalmente se utiliza cuando una muestra de agua sea esta simple o compuesta, no puede ser analizada en la zona de muestreo y por consiguiente debe ser trasladada a un laboratorio para su respectivo análisis (NTE INEN, 2013).

La tabla 2.1. indica las principales técnicas para conservar muestras de aguas residuales, en la cual se especifican los parámetros analizados en el presente estudio.

Tabla 2. 1.

Técnicas Generales para la Conservación de Muestras - Análisis Físico-Químico

Parámetro	Tipo de recipiente V, vidrio; P, plástico	Volumen típico (ml) y técnica de envasado	Técnica de preservación	Tiempo máximo recomendado de preservación antes del análisis después de la conservación	Comentarios	Método de ensayo NTE INEN
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	P o V	1000 Llenar contenedor completamente para excluir el aire.	Se enfría a 1°C y 5°C	24h	Mantener muestras almacenadas en la oscuridad.	1202
	P	1000	Congelar a -20 °C	1 mes	En caso de congelación para -20 °C: 6 meses (1 mes si <50 mg/l)	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	P o V	100	Acidificar a pH 1 a 2 con H ₂ SO ₄	1 mes	6 meses	1203
	P	100	Congelar a -20 °C	1 mes	6 meses	
Sólidos Suspendidos	P o V	500	Se enfría a 1°C y 5 °C	2 días		
Sólidos Totales	P o V	100	Se enfría a 1°C y 5 °C	24 h		

Fuente: Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013. Tabla 1

2.14. ANEXO 1 DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA

La presente norma técnica ambiental revisada y actualizada, rige en todo el territorio ecuatoriano, es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental y se somete a las disposiciones de los mismos. De forma general, establece los principios básicos y enfoque general para el control de la contaminación del agua; y por lo tanto es de aplicación obligatoria (TULSMA, 2015).

La tabla 2.2. detalla los límites máximos permisibles de los parámetros analizados en el presente estudio.

Tabla 2. 2.

Límites de Descarga a un Cuerpo de Agua Dulce

Parámetros	Expresados como	Unidad	Límite Máximo Permissible
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos Totales	SST	mg/l	1600
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Temperatura	°C		Condición natural ±3

Fuente: Acuerdo Ministerial 097-A del 04 de noviembre de 2015. Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA). R.O. No. 387. Anexo 1. Tabla 9.

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

El presente trabajo de Titulación se llevó a cabo en CIIDEA (Ciudad de Investigación, Innovación y Desarrollo Agropecuario) de la ESPAM “MFL” situada en el sitio El Limón, parroquia Calceta, Bolívar - Manabí. Los análisis de laboratorio se realizaron en el laboratorio de Química Ambiental del Área Agroindustrial y las muestras de agua fueron tomadas de la comunidad El Limón Adentro, parroquia Calceta, cantón Bolívar, provincia de Manabí, tabla 3.1.

Tabla 3. 1.

Coordenadas de la Zona de Muestreo y Laboratorio de la ESPAM MFL

LUGAR	COORDENADAS		DATUM ZONA
	X	Y	
Laboratorio de química ambiental	590528	9908642	WGS84 17S
Zona de toma de muestras	591015	9908282	

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

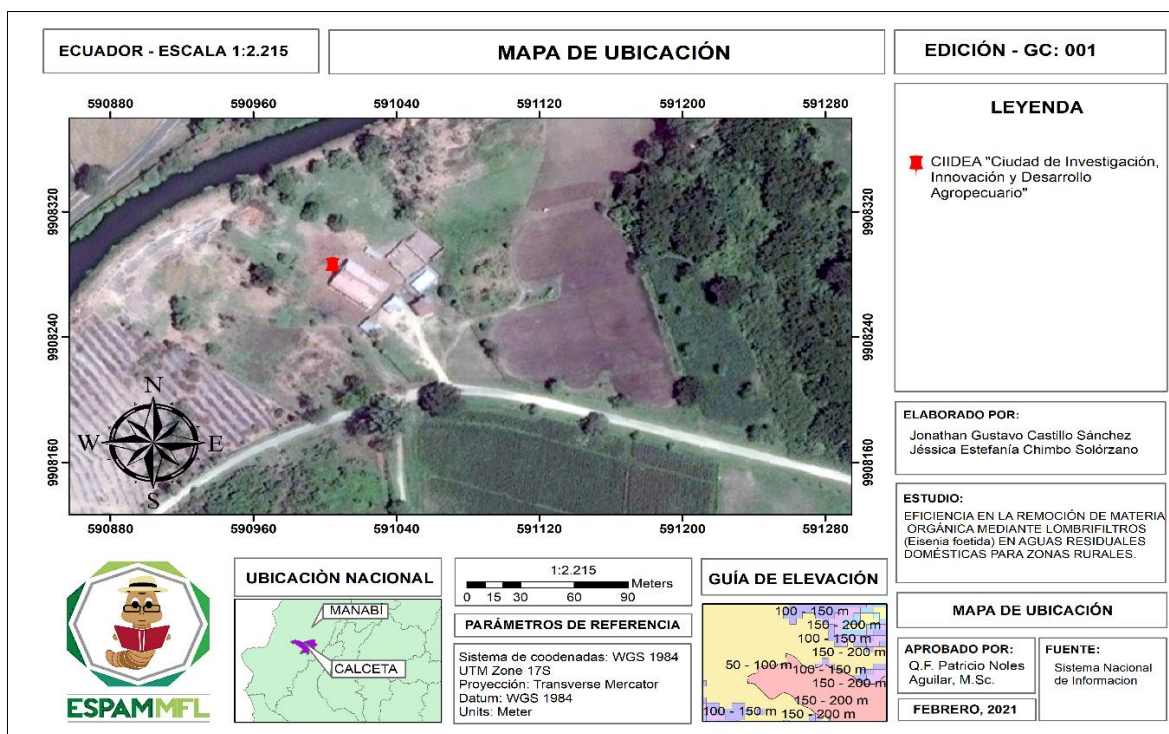


Figura 3.1. Mapa de Ubicación de Implementación del Proyecto
Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO

La presente investigación tuvo una duración de 8 meses, a partir de la aprobación de la propuesta de titulación.

3.3. FACTOR EN ESTUDIO

Agua residual doméstica.

3.4. TRATAMIENTOS

Se realizaron tres tratamientos, cada uno con tres repeticiones; lo que dio un total equivalente a nueve unidades experimentales.

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un diseño experimental completamente al azar con un solo factor, contando con tres tratamientos y con tres repeticiones por cada tratamiento, donde se obtuvo un total de nueve unidades experimentales.

Tabla 3. 2.

Diseño Experimental

Tratamiento	Q (l/s)	TRH (h)	R ₁	R ₂	R ₃
T ₁	X	X h			
		X h			
		X h			
T ₂	X	X h			
		X h			
		X h			
T ₃	X	X h			
		X h			
		X h			

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

3.6. UNIDAD EXPERIMENTAL

Muestras del agua residual doméstica tratada.

3.7. VARIABLES A MEDIR

3.7.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Lombrifiltro.

3.7.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Remoción de materia orgánica en aguas residuales.

3.8. CUADRO DE VARIANTES

Tabla 3. 3.

Cuadro de Variantes

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	ÍDICES
VARIABLE DEPENDIENTE		FÍSICOS	
		S.S.T.	mg/l
		S.T	mg/l
		pH	
		Temperatura	°C
	Se denomina como agua residual, aquella que procede de haber utilizado un agua natural o de la red en un uso determinado.	QUÍMICOS	
		DQO	mg/l
Remoción de materia orgánica en aguas residuales	Las AR domesticas comprenden las AR procedentes de zonas de vivienda y de servicios generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas (García & Gonzales, 2000).	BIOLÓGICOS	
		DBO ₅	mg/l
VARIABLE INDEPENDIENTE	Es un método de tratamiento de las aguas residuales desarrollado por el profesor José Tohá Castilla, y su equipo de colaboradores en el Laboratorio de Biofísica de la Universidad de Chile. Se trata de un filtro percolador compuesto de diferentes estratos filtrantes y lombrices	Altura de capas	cm
		Área	cm ²
Lombrifiltro		TRH	h
		Eficiencia de remoción	%

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

3.9. MÉTODOS

El método que se utilizó fue deductivo experimental.

3.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizaron los análisis estadísticos mediante el software estadístico InfoStat y Microsoft Excel.

- Análisis de la Varianza de un factor (ANOVA) DCA.
- Prueba de Tukey.
- Gráficos estadísticos.

3.11. MANEJO DEL EXPERIMENTO

3.11.1. FASE I. CARACTERIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AGUA RESIDUAL Y EL VOLUMEN A NIVEL DOMÉSTICO EN UNA ZONA RURAL.

Actividad 1. Ubicación del sitio de muestreo.

Para la selección del lugar de muestreo se realizó un recorrido con el fin de identificar el punto exacto de vertimiento de las aguas residuales domésticas, donde se procedió a realizar el muestreo.

Actividad 2. Cálculo del volumen de agua residual doméstica.

Tomando como referencia la metodología propuesta por Saboya (2018), se calculó el caudal, a partir del método volumétrico para lo cual fue necesario contar con un cronómetro y un recipiente de volumen conocido. Esta medición consistió en introducir un recipiente de 4 l en la caída del agua procurando receptor toda la descarga, evitar derrames del agua residual y lograr un dato más preciso del caudal. El tiempo se lo tomó inmediatamente al haber introducido el recipiente en la

vertiente hasta su respectiva extracción; repitiendo este proceso por dos ocasiones a las 14h00, durante cinco días, para posteriormente obtener un dato promedio del volumen utilizando la siguiente ecuación:

$$V = Q * t \quad [3.1]$$

Donde:

V = volumen

Q = caudal

t = tiempo

Actividad 3. Toma de muestras del agua residual doméstica.

La toma de muestras se llevó a cabo en la casa del Tlgo. Alfredo Pinargote en la comunidad El Limón Adentro, parroquia Calceta, cantón Bolívar, provincia de Manabí. Esta se realizó durante un período de 15 días, se tomaron muestras de 5 l diarios a las 14h00 ya que García (2012) recomienda tomar las muestras en las horas donde hay mayor actividad y movimiento de las personas, para que la concentración de la materia orgánica del agua residual sea la adecuada para el tratamiento.

El procedimiento utilizado para el muestreo fue en base a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176:2013 (Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo). Para lo cual fue necesario la purga de los envases tres veces antes de realizar la recolección de la muestra. El transporte de las mismas se lo realizó en un cooler y fueron almacenadas en refrigeración a 4° C, de las cuales 5 l fueron utilizados para el análisis en laboratorio, 10 l para el proceso de adaptación del material biológico (*Eisenia foetida*) y los 60 l restantes fueron utilizados para el tratamiento en el lombrifiltro.

El tipo de recipiente que se utilizó para la toma de muestras fue seleccionado de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013, establecidos en la

tabla 1: Técnicas generales para la conservación de muestras – análisis físico-químico.

Actividad 4. Determinación de materia orgánica del agua residual doméstica previo al tratamiento.

Para calcular el valor de los parámetros del agua residual doméstica, se procedió a desinfectar los recipientes a usar, y su correspondiente homogenización y preservación, para luego ser destinados a el laboratorio de química ambiental del área agroindustrial de la ESPAM MFL para la evaluación de los parámetros descritos en la tabla 3.5. Sin embargo, la DQO fue calculada a partir de valores de la DBO_5 , para ello se utilizó la ecuación propuesta por Eckenfelder y Musterman (1995), la cual se detalla a continuación:

$$DQO = \frac{DBO_5}{(f_a(1-f_{DBO}))} \quad [3.2]$$

Donde:

f_a = Representa la relación DBO_5/DBO_u que depende, entre otros factores, del valor de la constante k . Para ello la DBO_u fue calculada mediante la ecuación 3.3. propuesta por Trapote (2013).

$$DBO_u = 1,5 * DBO_5 \quad [3.3]$$

f_{DBO} = Es el factor de corrección que tiene en cuenta los compuestos inertes generados durante la lisis de la biomasa. Generalmente se adopta $f_{DBO} = 0,15$.

Tabla 3. 4.*Técnicas de los Parámetros a Analizar*

PARÁMETRO	TECNOLOGÍA	MÉTODO
DBO ₅	OXI-TOP	Método por incubación de agua durante 5 días a 20°C.
DQO	-	Estimación con ecuación a partir del valor de DBO ₅
S.S.T.	Gravimétrico	SM2540 D. Total de sólidos suspendidos secados a 103-105 °C
S.T.	Gravimétrico	SM 2540 C. Sólidos totales secados a 180 °C
pH	Potenciométrico	Método directo
Temperatura		Método directo

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

3.11.2. FASE II. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL LOMBRIFILTRO COMPUESTO POR *Eisenia foetida*.

Actividad 5. Diseño y construcción del lombrifiltro.

El lombrifiltro fue diseñado en base al estudio realizado por Ramón *et al.* (2015), quienes indican que se tiene un tanque alimentador de 60 l, el cual vierte al lombrifiltro el agua residual, pasando el agua por un tubo de PVC agujerado para permitir un caudal continuo y estable. De esta manera pudo ser repartida homogéneamente el agua residual al sustrato del lombrifiltro. Considerando el estudio de Orozco (2014), en el diseño se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: caudal, tiempo de retención hidráulico, profundidad, ancho y largo de la caja, y altura del sistema.

Los lechos fueron clasificados de la siguiente forma: aserrín con lombriz, seguido de un lecho con carbón activado, pasando luego por un lecho de grava, para finalmente colocar un lecho de piedra de río; permitiendo filtrar y oxigenar el líquido sin llegar a generar malos olores. Debido a que el proceso es aerobio, el agua filtrada por cada uno de los lechos filtrantes se recolectó en el último recipiente, que fue usado para la toma de muestras de laboratorio.

La altura de las capas del lombrifiltro se calculó con la ecuación propuesta por Coronel (2015), la cual es la siguiente:

$$X = \frac{\% \text{ total del estrato} * \text{altura útil del lombrifiltro}}{100} \quad [3.4]$$

Actividad 6. Obtención de las lombrices (*Eisenia foetida*).

Las lombrices fueron recolectadas de camas de lombricultura de CIIDEA - ESPAM MFL. Para la recolección se realizó una excavación de aproximadamente 30 cm de profundidad, donde se empezó a recolectar a las lombrices mediante una lampa y luego a separarlas de la tierra que se encuentra impregnada en las mismas. Se utilizó 1 kg de lombrices para el proceso de remoción, lo cual tiene un precio referencial de \$20,00.

Actividad 7. Adaptación de *Eisenia foetida* al agua residual doméstica.

Antes de colocar a las lombrices *Eisenia foetida* en el lombrifiltro para iniciar el proceso de tratamiento de las aguas residuales, fue necesario que pasen por un proceso de aclimatación para que logran adaptarse de manera progresiva a estar en contacto con las aguas residuales, de lo contrario exponerlas de manera directa dañaría la epidermis de las lombrices, incluso podría generar cambios bruscos de su entorno o hábitat afectando su metabolismo.

En base a la investigación realizada por Loro (2018) el proceso de adaptación fue de 10 días, la misma que consistió en regar diariamente 1 l de agua residual doméstica a una caja con sustrato (humus) donde habitaban todas las lombrices, dicha caja tenía agujeros en la base y una malla plástica tipo Raschell, lo cual permitía evacuar el exceso de agua por infiltración, pero a su vez mantenía húmedo el sustrato necesario para la respiración de las lombrices.

Durán y Henríquez (2009) recomienda que, en este periodo de aclimatación, se debe evaluar la reproducción y el acondicionamiento de las lombrices *Eisenia*

foetida en el sustrato orgánico a utilizar, controlando su pH, % de humedad y temperatura.

Actividad 8. Medición del caudal y Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

Para la medición del caudal se empleó el método volumétrico. Se abrió la llave de control del tanque alimentador y se colocó un recipiente de 1 l debajo de las tuberías que asperjan el agua, se recolectó el agua residual durante 1 minuto y se retiró el recipiente con el agua recolectada. Posteriormente se midió la cantidad de agua residual recolectada, esta acción se repitió tres veces para obtener resultados más acertados. Los tiempos de retención hidráulico (TRH) fueron medidos como el tiempo que demora el agua en pasar por el estrato e iniciar su aparición en el fondo de este, empleando cada uno de los caudales seleccionados. Para ello se utilizó la ecuación propuesta por Coronel (2015).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad [3.5]$$

Actividad 9. Determinación de materia orgánica del agua residual doméstica después del tratamiento.

Con la finalidad de determinar la concentración de materia orgánica del agua residual doméstica a la salida del lombrifiltro, se realizaron los análisis respectivos en cuanto a DBO₅, DQO, SST, ST, pH y Temperatura, los cuales fueron realizados en el laboratorio de Química Ambiental del Área Agroindustrial de la ESPAM MFL, a excepción de la DBO₅, la misma que fue determinada por el laboratorio de Investigación de la Universidad de las Américas - Quito - Ecuador.

Actividad 10. Determinación de la eficiencia (porcentaje de remoción).

Para evaluar el funcionamiento del prototipo biológico compuesto de *Eisenia foetida* se determinó el porcentaje de eficiencia de los parámetros analizados con la ecuación propuesta por Caicedo (2017), la cual es la siguiente:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(\text{Concentración inicial}) - (\text{Concentración final})}{(\text{Concentración inicial})} * 100 \quad [3.6]$$

3.11.3. FASE III. CÁLCULO DEL COSTO BENEFICIO DEL LOMBRIFILTRO A BASE DE LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*).

Actividad 11. Análisis costo/beneficio.

Una vez determinado la eficiencia del lombrifiltro, se calculó el costo del mismo para generar un presupuesto, en este procedimiento se tomaron en cuenta todos los gastos generados durante el proceso de adaptación de *Eisenia foetida* al agua residual doméstica, además de la construcción del prototipo.

Para la sumatoria se adoptó la metodología propuesta por (Vinza, 2012), en donde se calculó el valor de la materia prima, la mano de obra directa y el gasto de producción, generando una sumatoria total a partir de la siguiente ecuación:

$$CP = (Mp + Mod + Gp) [3.7]$$

Dónde:

- CP = Costo de producción
- Mp = Materia prima
- Mod = Mano de obra directa
- Gp = Gasto de producción

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AGUA RESIDUAL Y EL VOLUMEN A NIVEL DOMÉSTICO EN UNA ZONA RURAL.

Se realizó el muestreo en el efluente de una casa en la comunidad El Limón Adentro, parroquia Calceta, cantón Bolívar, provincia de Manabí. Asimismo, se constató que el caudal estimado a nivel doméstico es de $5,18 \text{ m}^3/\text{día}$.

En la tabla 4.1., se muestran los resultados obtenidos de la caracterización inicial del afluente, junto a los criterios de límites máximos permisibles para descargas a cuerpos de agua dulce establecidos en el Anexo 1 TULSMA: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua, Tabla 9: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Tabla 4. 1.

Características Físicoquímicas del Agua Residual Doméstica Previa a Tratamiento

Parámetro	Unidad	Valor obtenido	LMP
DBO ₅	mg/l	74	100
DQO	mg/l	130,59	200
S.S.T.	mg/l	1468	130
S.T.	mg/l	1987	1600
pH		6,90	6-9
Temperatura	°C	22,2	Condición natural ± 3

Fuente: Acuerdo Ministerial 097-A del 04 de noviembre de 2015. Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA). R.O. No. 387. Anexo 1. Tabla 9.

Se puede constatar que el agua residual doméstica sin tratar, presentó un valor de DBO₅ y DQO igual a 74 y 130,59 mg/l respectivamente, es decir, se encuentra dentro del límite máximo permisible que establece la normativa ambiental vigente del Ecuador. Sin embargo, los sólidos suspendidos y sólidos totales se encontraron por encima del límite establecido, con valores de 1468 y 1987 mg/l respectivamente. Por otra parte, el pH del agua se encuentra dentro del rango 6 - 9 al igual que la temperatura con 22,2 °C.

En consecuencia, a pesar de que se encuentra por debajo del límite máximo permisible para DBO₅ y DQO, la acumulación diaria de este tipo de agua residual doméstica representa un grave problema, ya que la presencia de materia orgánica en exceso y organismos patógenos, así como su constante acumulación, podría traer como resultado la aparición de enfermedades en los habitantes que residen en la zona de estudio. Pues de acuerdo con Sosa *et al.* (2014), la ausencia de personal capacitado y los elevados costos de operación y mantenimiento que no permiten un tratamiento a tiempo de estas aguas, pudiera ocasionar contaminación ambiental, así como afectaciones en la salud.

Además, en base a la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (1995), en la cual se detalla la composición típica de un agua residual doméstica, se tiene que las características iniciales del afluente sin tratamiento corresponden a un agua residual de concentración baja para DBO₅ y DQO, así como de concentración alta en cuanto a los sólidos totales y suspendidos.

4.2. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL LOMBRIFILTRO COMPUESTO POR *Eisenia foetida*

4.2.1. DISEÑO DEL LOMBRIFILTRO

La figura 4.1., muestra las dimensiones del lombrifiltro, donde las medidas internas respectivamente son: ancho 25 cm, largo 44 cm y altura 25 cm. Así mismo, en la tabla 4.2., se detalla la altura del material filtrante a colocar en cada capa. Para ello se tomó en cuenta el estudio realizado por Salazar (2005), donde se recomienda que la parte biológica debe contener el mayor porcentaje. Por lo tanto, se dispuso de un 40% para la primera capa de material biológico (*Eisenia foetida*+aserrín), seguido de un 20% para los estratos de carbón activado, grava y piedra.

Tabla 4. 2.

Dimensiones de Material Filtrante en Cada Capa de la Estructura

Descripción	Altura (cm)	Porcentaje (%)
<i>Eisenia foetida</i> + aserrín	26	40
Carbón activado	13	20
Grava	13	20
Piedra	13	20

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

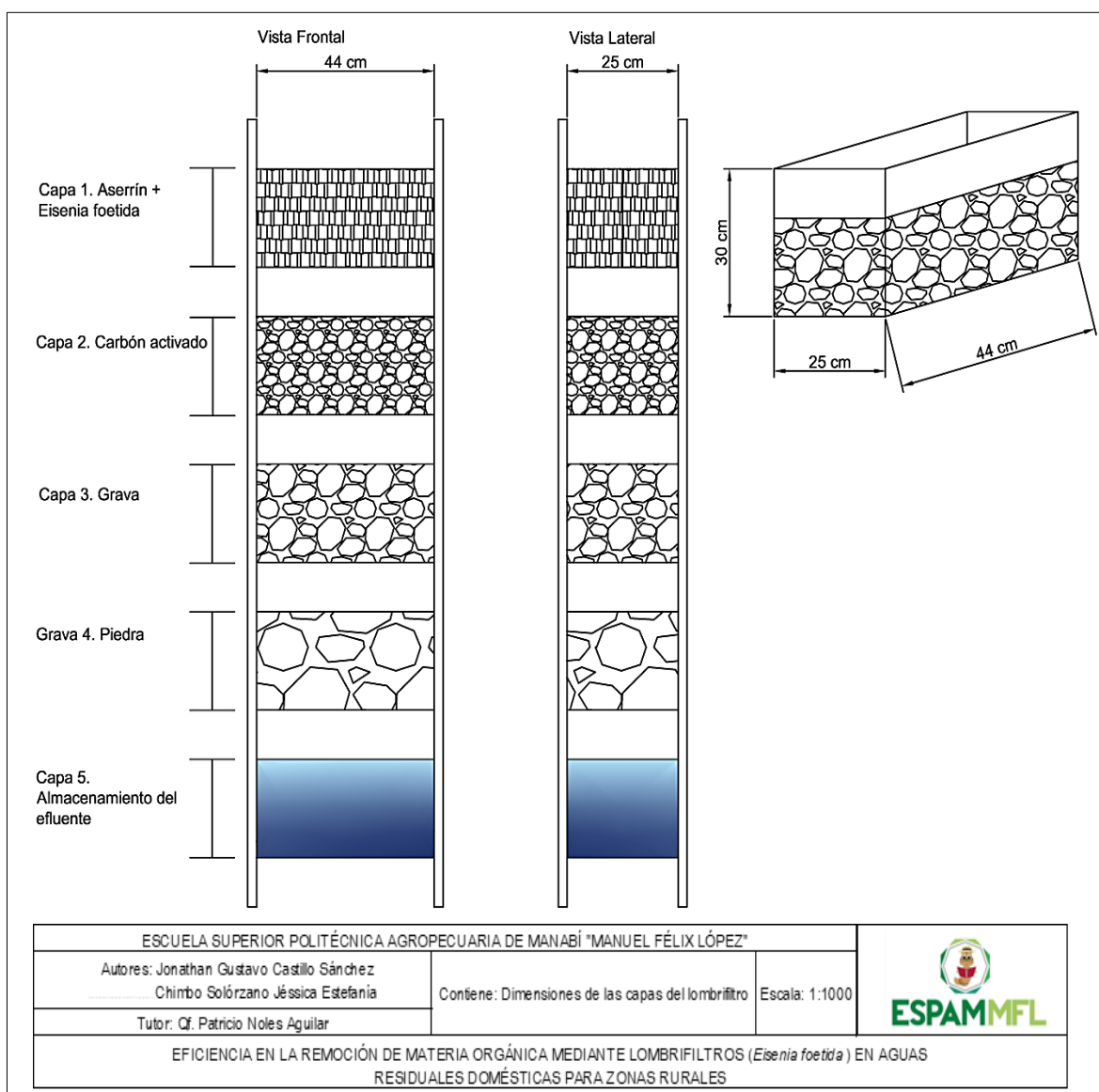


Figura 4. 1. Diseño del Lombrifiltro

Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

4.2.2. ADAPTACIÓN DE *Eisenia foetida* AL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

En la figura 4.2., se muestran los resultados del proceso de adaptación de la lombriz *Eisenia foetida* durante diez días. Se puede observar que la temperatura en el proceso de adaptación se mantuvo entre 22 y 23 °C. Esto concuerda con lo expuesto por Acosta *et al.*, (2013), quienes mencionan que la temperatura óptima para el desarrollo de la *Eisenia foetida* en cualquier sustrato debe oscilar entre 20 y 25 °C. Asimismo, Valdez (2013) indica que este tipo de lombriz puede reproducirse en cualquier parte del mundo mientras sea en un lugar con climas templados con temperaturas promedio superior a los 20°C.

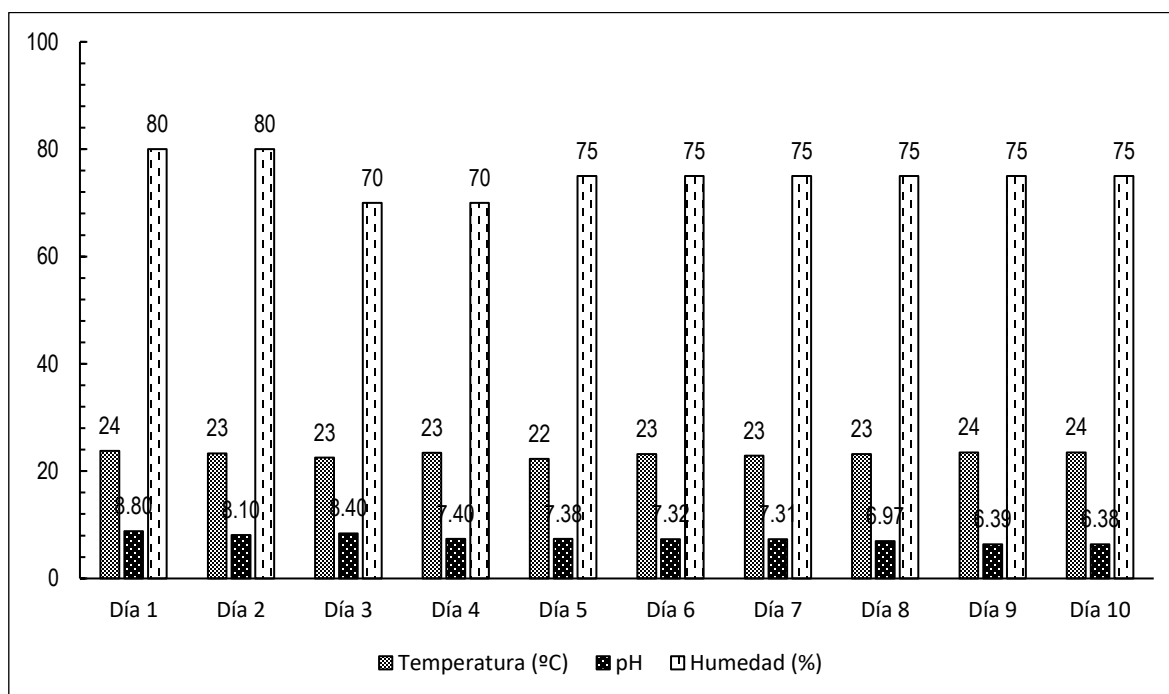


Figura 4. 2. Adaptación de *Eisenia foetida* al Agua Residual Doméstica Durante 10 días
Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

Por otra parte, el pH fue superior a 8 los tres primeros días, disminuyendo consecutivamente hasta experimentar un descenso final de 6,38. Según Pramanik & Chung (2011), las lombrices *Eisenia foetida*, están adaptadas para sobrevivir en entornos difíciles y en condiciones moderadamente ácidas o alcalinas, con un valor de pH que oscila entre 4,5 y 9. Sin embargo, de acuerdo con Paico (2017), las condiciones ideales y favorables para su hábitat comprende un pH entre 6,5 - 7,5

ya que fuera de ese rango la lombriz entra en un estado de latencia, la cual puede ocasionar la muerte de las mismas. Por otra parte, se produjeron dos decesos, esto debido al manejo del experimento.

El porcentaje de humedad fue de 80% los dos primeros días. Posteriormente, el tercer y cuarto día descendió a 70% y el resto del periodo de adaptación se mantuvo en un 75%. En consecuencia, Loro (2018) menciona que las condiciones de humedad más favorables para la *Eisenia foetida* oscilan entre 70% - 80%, ya que ambientes con humedades fuera de este rango puede ser mortal para las lombrices.

4.2.3. CAUDAL Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

Para la medición del caudal se realizó tres repeticiones con tres tipos de apertura de la válvula de control, a partir de la cual se obtuvo un caudal promedio por cada tratamiento y así obtener resultados más exactos del TRH, los mismos que se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4. 3.

Tiempo de Retención Hidráulico de Acuerdo a los Caudales Obtenidos

Tratamiento	Q (l/s)	TRH (h)
T ₁ (25% apertura válvula de control)	1,8×10 ⁻²	0,92
T ₂ (50% apertura válvula de control)	3,4×10 ⁻²	0,49
T ₃ (100% apertura válvula de control)	1,13×10 ⁻²	0,15

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

En la experimentación realizada y en base a los caudales calculados in situ, se obtuvo un TRH de 0,92h, 0,49h y 0,15h para el primer, segundo y tercer tratamiento aplicado respectivamente. Es por ello que, de acuerdo a las observaciones respectivas, se pudo evidenciar que T₃ provocó acumulación de agua en la primera capa (aserrín + *Eisenia foetida*), lo cual, teniendo en cuenta a Caicedo (2017), no es favorable para el tratamiento del agua residual, debido a que las lombrices solo necesitan un 70 a 80% de humedad para una óptima degradación de la materia orgánica.

Por otra parte, la aplicación de T₂ no ocasionó ningún tipo de acumulación de agua. Sin embargo, la eficiencia de remoción no fue la más idónea, mientras que, con T₁, el agua se distribuyó homogéneamente por el lombrifiltro sin producir inundaciones y en un tiempo prudente. Además, fue con este que se obtuvieron los mejores resultados de remoción de la materia orgánica.

En efecto, Manyuchi *et al.* (2019) argumentan que el tiempo de retención hidráulico influye directamente en el rendimiento del lombrifiltro, pues a mayor tiempo de retención mayor será la eficiencia de remoción. En consecuencia, una prolongación de tiempo de retención hidráulico favorece la calidad de biomasa y evita la aglomeración de materia, la misma que pudiera disminuir la eficiencia del tratamiento (Kumar *et al.*, 2016).

4.2.4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA (PORCENTAJE DE REMOCIÓN)

Se determinó la eficiencia del lombrifiltro utilizando la ecuación [3.6], mediante los valores de concentración de los diferentes parámetros del agua que ingresó al sistema (afluente) y la del agua que salió después del tratamiento (efluente).

a. DBO₅ y DQO

Según se muestra en la tabla 4.4., los resultados son corroborados con el análisis de varianza (ANOVA), determinando que existen grandes similitudes en la capacidad de remoción de materia orgánica, es decir, no existen diferencias significativas entre los tres tratamientos aplicados para la remoción de DBO₅ y DQO, ya que el p-valor es de 0,3170 con un nivel de significancia del 95%.

Tabla 4. 4.

Análisis de Varianza (ANOVA) para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Eficiencia	9	0,32	0,09	1,95

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,84	2	1,42	1,40	0,3170
Tratamiento	2,84	2	1,42	1,40	0,3170
Error	6,07	6	1,01		
Total	8,91	8			

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

Tal como muestra la figura 4.3., y obteniéndose como resultado la remoción en porcentajes respecto a los tiempos de retención hidráulicos (TRH), la máxima eficiencia de remoción de DBO_5 correspondió a T₁, con una media de 52,25% seguido por T₂ y T₃, con 51,35% y 50,90% respectivamente. Por esta razón, todos los tratamientos reportaron concentraciones finales inferiores a 40 mg/l.

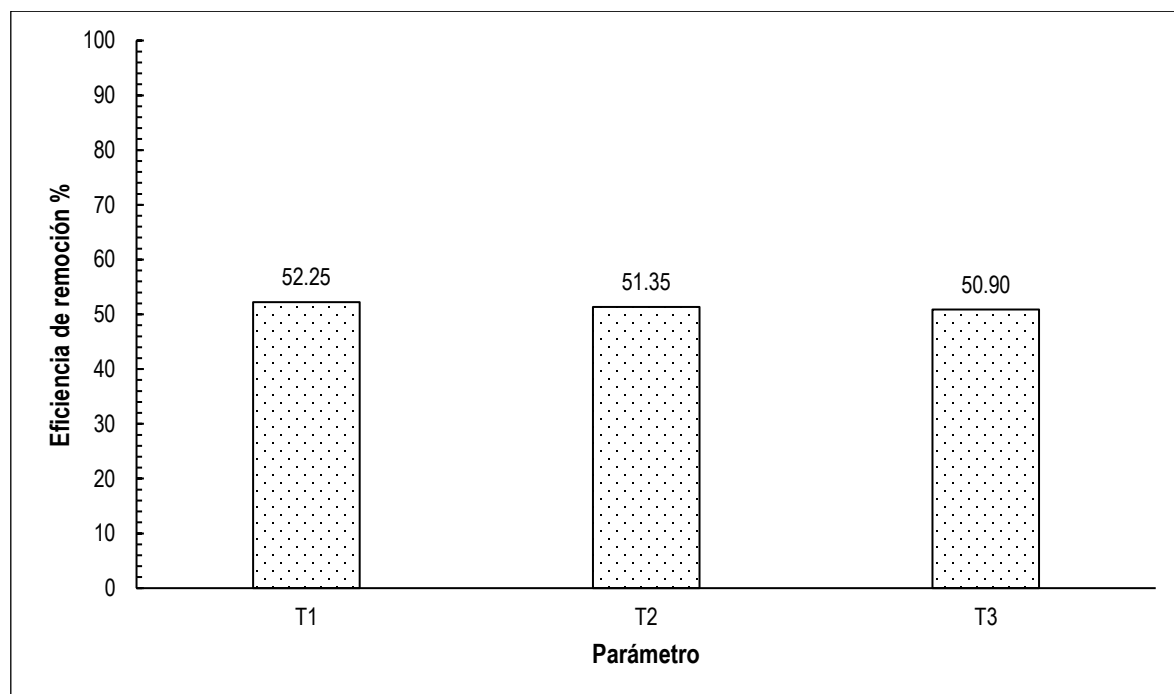


Figura 4. 3. Porcentaje de Remoción de DBO_5
Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

Las eficiencias de materia orgánica medida como DBO_5 , son inferiores a las publicadas por Saboya (2018), aplicando también el sistema Tohá con *Eisenia foetida*, cuyos porcentajes medios fueron de 91%. Sin embargo, los presentes resultados se asemejan a los obtenidos por Huiza y Ordoñez (2018), los cuales determinaron la eficiencia de un lombrifiltro implementando la técnica de pared caliente para tratar aguas residuales domésticas, en la que confirman una eficiencia de remoción superior al 50% de la carga orgánica inicial.

La figura 4.4., muestra que la DQO obtuvo el mismo porcentaje de remoción en comparación con la DBO_5 para los tres tratamientos, con la diferencia de que la concentración en cada uno de ellos fue mayor. Cabe destacar que todas las réplicas obtuvieron concentraciones menores al límite máximo permisible establecido en la Normativa Ambiental Vigente, específicamente para descargas de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

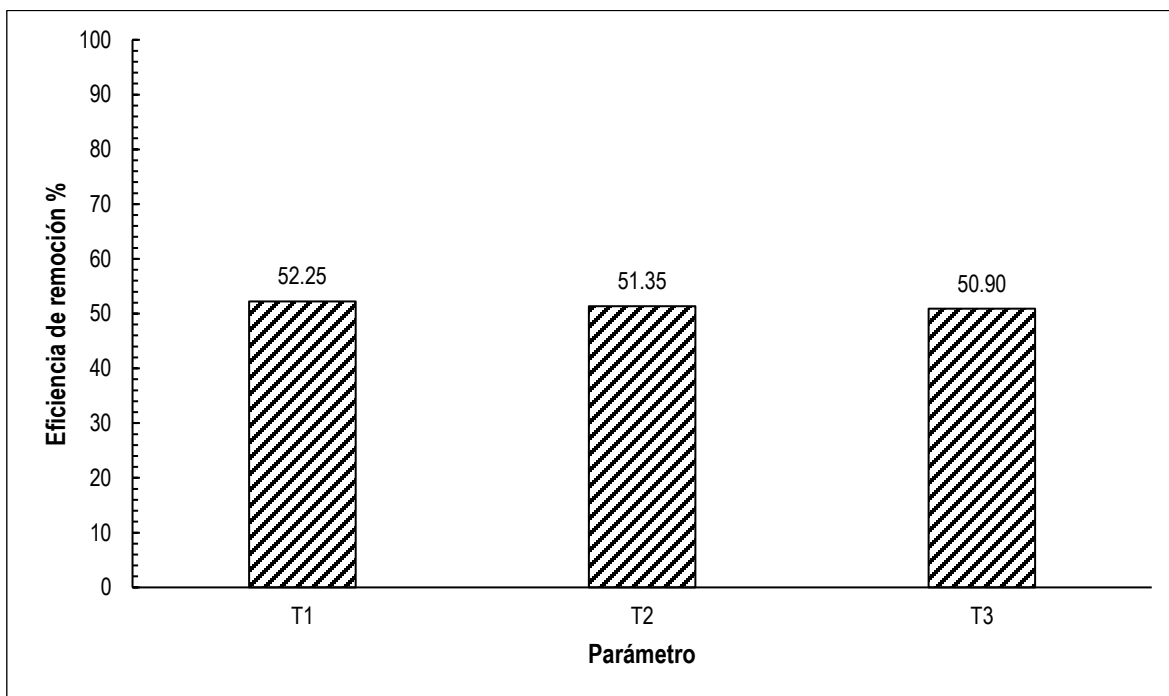


Figura 4. 4. Porcentaje de Remoción de DQO
Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

En varios estudios relacionados al tratamiento de aguas residuales, los porcentajes de remoción se aproximan a los obtenidos. Tal es el caso de Mejía *et al.* (2017),

quienes mediante un prototipo a escala de laboratorio lograron obtener una remoción de 53% de QDO en aguas residuales domésticas.

Por su parte, como afirman Kadlec *et al.* (2000), uno de los principales motivos por los que existe una reducción significativa de la DQO, es el metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios, que a través de compuestos orgánicos del agua producen biomasa, así como a las reacciones químicas de óxido reducción, mediante las cuales se da dicho proceso.

b. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Al realizar un análisis de varianza para SST se comprueba que existen diferencias significativas entre los tres tratamientos aplicados ($p < 0,0001$). Es decir, las diferencias de porcentajes de remoción no se deben al azar y por tanto se aprueba la hipótesis alternativa, existiendo así un notable efecto de los caudales aplicados en el proceso de tratamiento del agua residual, tabla 4.5.

Tabla 4. 5.

Análisis de Varianza (ANOVA) para Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Eficiencia	9	0,99	0,99	2,56	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1634,11	2	817,06	524,03	<0,0001
Tratamiento	1634,11	2	817,06	524,03	<0,0001
Error	9,35	6	1,56		
Total	1643,47	8			

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

De esta manera, al realizar una comparación de medias mediante la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad de error, se identificaron tres grupos significativamente diferentes, de los cuales se observa claramente a T₁ como el mejor, con una eficiencia media de 66,74% de remoción, tabla 4.6.

Tabla 4. 6.

Prueba de Tukey para Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
T ₃	34,33	3	0,72	A	
T ₂	45,10	3	0,72		B
T ₁	66,74	3	0,72		C

Nota. Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=3,12820

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

En consideración al comportamiento de los tratamientos frente a la eficiencia de remoción de SST, la figura 4.5., muestra que T₁ logró obtener los mejores resultados alcanzando una media de 66,74%, la cual se asemeja a los reportes publicados por Cáceres *et al.* (2018), quienes consiguieron una concentración promedio de 33 mg/l con una eficiencia del 66,67%.

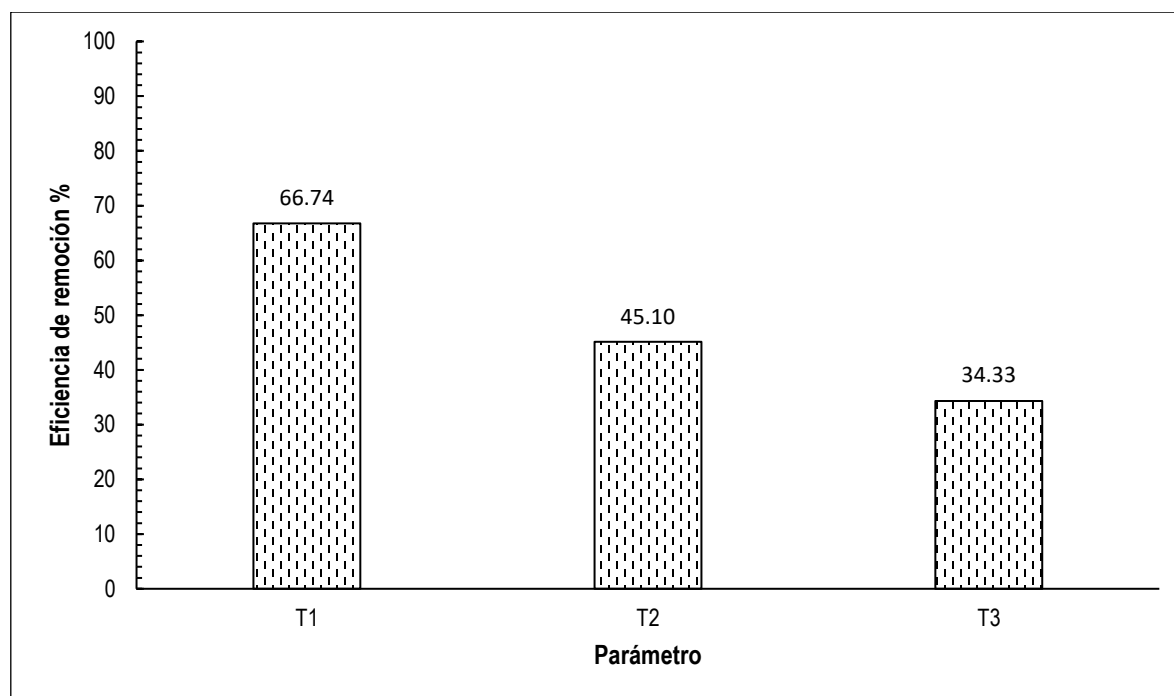


Figura 4. 5. Porcentaje de Remoción de SST

Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

Asimismo, los porcentajes de remoción de este parámetro en los tres tratamientos aplicados son superiores a los reportados por Loro (2018), el cual obtuvo un 40% de remoción debido a que la capa de estiércol vacuno y aserrín aumentaron la carga de SST a la salida del lombrifiltro.

c. Sólidos Totales (ST)

La tabla 4.7., muestra el ANOVA correspondiente al parámetro ST, en la cual se aprecia una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos, dado que el p-valor es menor a 0,05.

Tabla 4. 7.
Análisis de Varianza (ANOVA) para Sólidos Totales (ST)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Eficiencia	9	1,00	1,00	1,82	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1365,03	2	682,51	1528,36	<0,0001
Tratamiento	1365,03	2	682,51	1528,36	<0,0001
Error	2,68	6	0,45		
Total	1367,71	8			

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

En la tabla 4.8., se detalla la prueba de Tukey al 5% de probabilidad de error, constatando nuevamente que existe diferencia significativa entre la media de porcentajes de remoción entre un tratamiento y otro. Por tanto, se comprueba que los caudales aplicados, así como los TRH tienen un aporte estadísticamente significativo en la remoción de ST.

Tabla 4. 8.
Prueba de Tukey para Sólidos Totales (ST)

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
T ₃	23,12	3	0,39	A	
T ₂	33,94	3	0,39		B
T ₁	52,91	3	0,39		C

Nota. Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,67414

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Fuente: Castillo & Chimbo (2020)

De acuerdo a la figura 4.6., T₁ obtuvo la mayor eficiencia de remoción de sólidos totales, obteniendo una media de 52,91%. Por otra parte, se observó un promedio de 33,94 y 23,12% de eficiencia de remoción para T₂ y T₃, con concentraciones

finales que superan el límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental vigente.

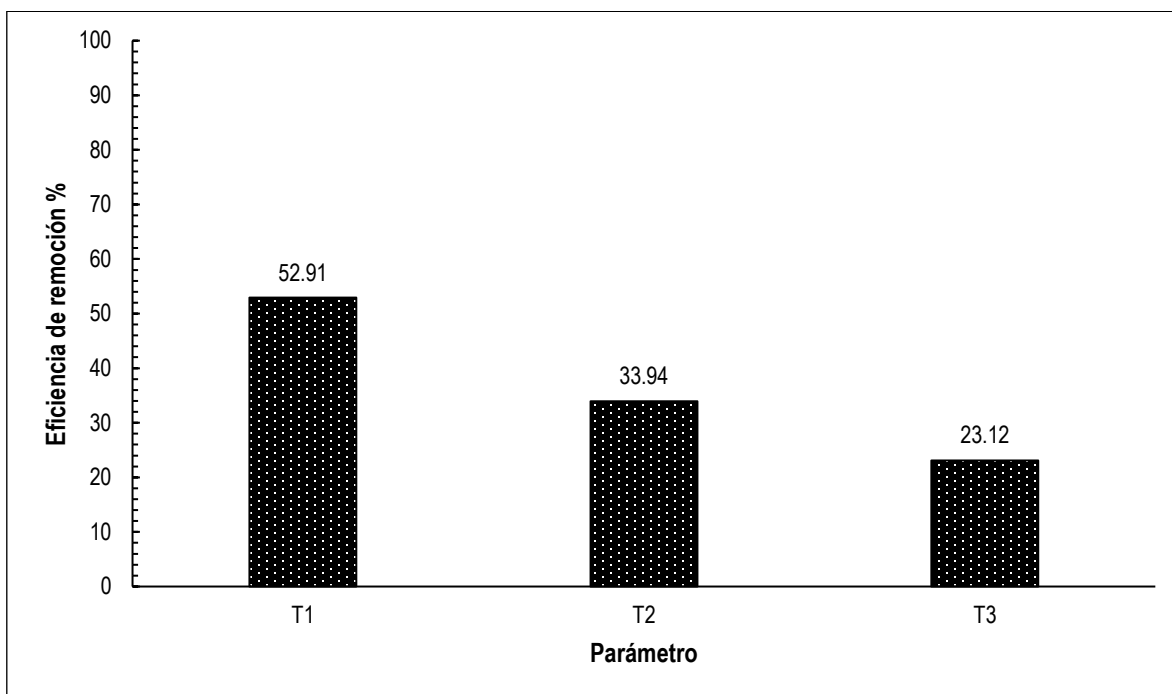


Figura 4. 6. Porcentaje de remoción de ST
Elaborado por: Castillo & Chimbo (2020)

Teniendo en cuenta a Xing *et al.* (2010), la disminución significativa de sólidos totales se atribuye a la actividad de las lombrices de tierra en la bioconversión del material sólido del agua residual en vermicompost, lo cual coincide con Singh *et al.* (2017), quienes confirman que los sólidos retenidos en el lecho filtrante de aserrín son consumidos por las lombrices de tierra y convertidos en humus y por lo tanto no hay generación de lodo como se ve en otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Por tal motivo, los sólidos de aguas residuales compostados por la *Eisenia foetida* pueden ser útiles aditivos para el suelo ya que ayudan a mejorar su fertilidad (Sinha *et al.*, 2008).

En concordancia con los análisis descritos, se comprueba que T₁ con un caudal de $1,8 \times 10^{-2}$ l/s y un TRH de 0,92 h obtuvo la mayor eficiencia de remoción para DBO₅, DQO, SST y ST, concluyendo que mientras más tiempo tarda el agua residual doméstica en descender por los lechos filtrantes, más eficiente es la remoción de materia orgánica de la misma.

d. pH

El seguimiento del comportamiento del pH es un factor de suma importancia en los procesos de transformación química y biológica para tratamientos de aguas residuales (Romero et al., 2009). En la figura 4.7., se presenta el seguimiento de este parámetro, observando que en el agua residual sin tratamiento con el lombrifiltro fue de 6,9; mientras que el agua tratada no presentó variaciones bruscas con un pH entre 6,32 y 7,32 para los diferentes tratamientos. Es decir, el valor del pH del agua residual tratada fue prácticamente neutralizado por las lombrices *Eisenia foetida* en el lombrifiltro, manteniendo un promedio de 6,8.

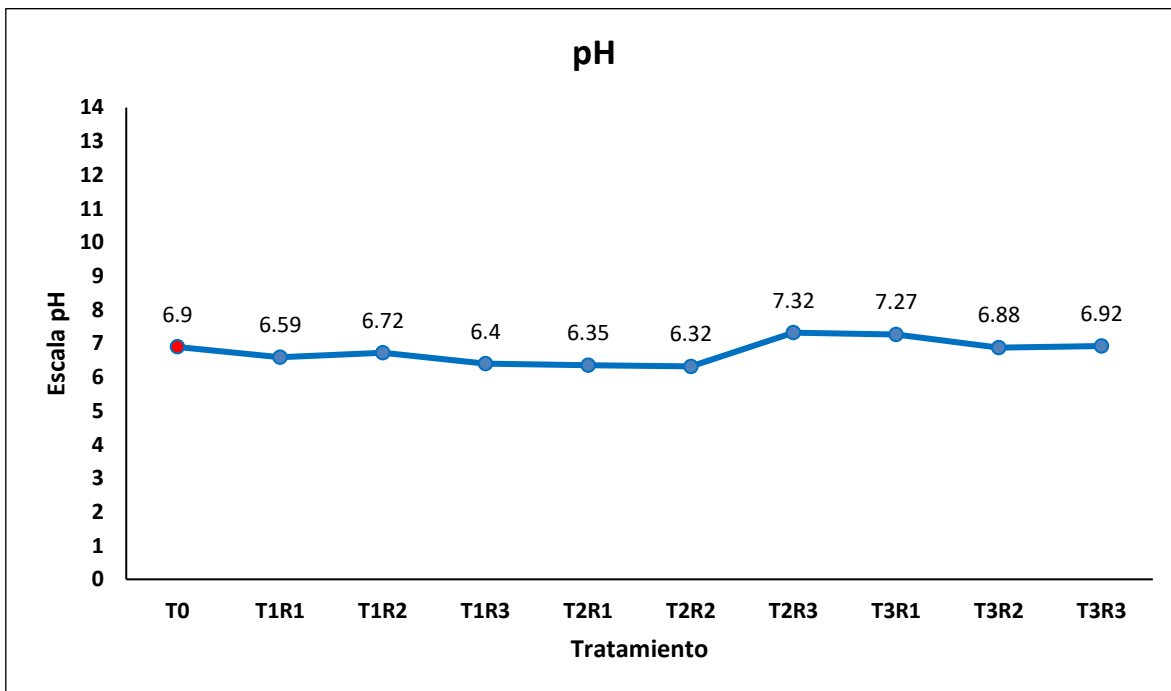


Figura 4. 7. Comportamiento del pH del Agua Residual Doméstica Tratada
Elaborado por: Castillo y Chimbo (2020)

Similar comportamiento reportó el estudio realizado por Santos y Oliveira (2011) en el tratamiento de aguas residuales porcinas, en el cual, durante el tratamiento biológico, el pH se estabilizó con rangos similares.

e. Temperatura

En el tratamiento de aguas residuales por vermifiltración, la eficiencia de remoción de materia orgánica depende en gran medida del metabolismo microbiano

(Baumgartner, 2013). De acuerdo con la figura 4.8., se puede observar que la temperatura se mantuvo entre 22,1 y 22,7 °C. En la investigación realiza por Ramón *et al.* (2015), así como en la de Coronel (2015), no se consideraron claramente los efectos del tratamiento con la lombriz *Eisenia foetida* sobre este parámetro.

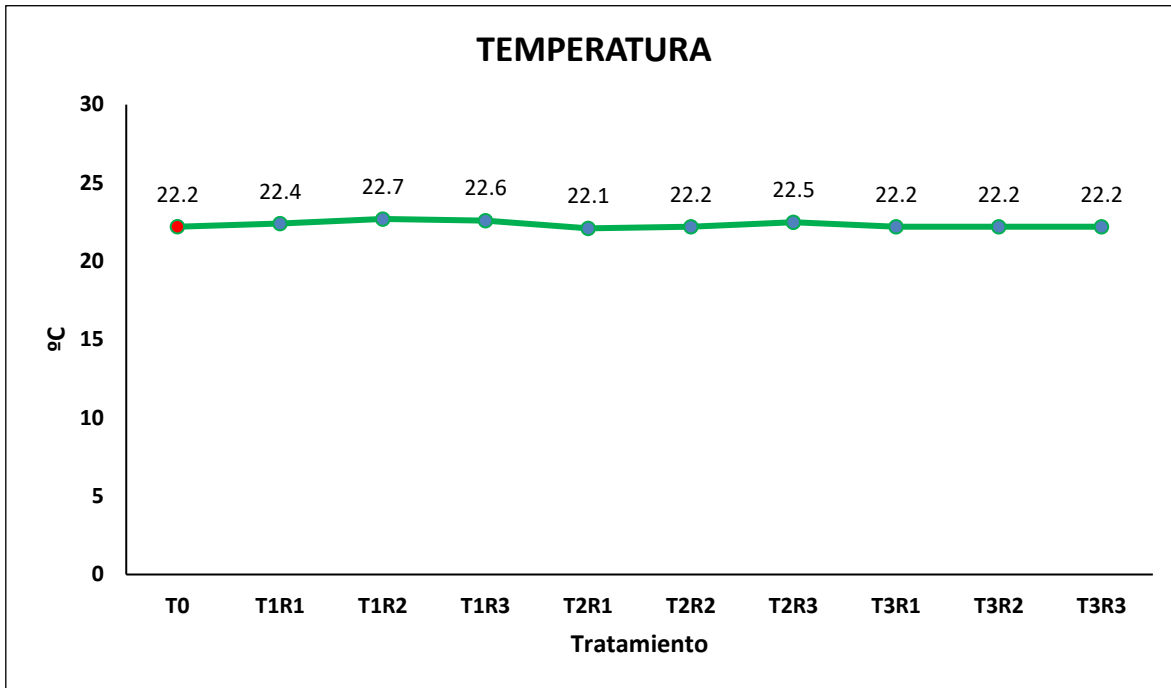


Figura 4. 8. Comportamiento de la Temperatura del Agua Residual Doméstica Tratada
Elaborado por: Castillo y Chimbo (2020).

Por su parte, Loro (2018) afirma que la temperatura es un parámetro de vital importancia, el cual debe ser monitoreado constantemente ya que determina las condiciones esenciales para el desarrollo de microorganismos y de la *Eisenia foetida* en las reacciones químicas, pues su actividad metabólica se acelera con la temperatura y viceversa.

4.3. CÁLCULO DEL COSTO BENEFICIO DEL LOMBRIFILTRO A BASE DE LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*).

En la gestión de recursos hídricos, así como en el tratamiento de aguas residuales, se ponen en práctica una serie de metodologías como apoyo al proceso de toma de decisiones. De esta manera, uno de los métodos más utilizados y con mayor aceptación es el Análisis Costo-Beneficio (Sancho *et al.*, 2010).

En la tabla 4.9., se detalla la cantidad y el valor unitario de los materiales utilizados en la construcción del lombrifiltro.

Tabla 4. 9.

Costo de Producción del Lombrifiltro

MATERIALES	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Materiales metálicos (construcción de estructura metálica)	50,00
Láminas de vidrio, material galvanizado (construcción de las cajas)	70,00
Pintura	1 l	3,95	3,95
Diluyente	2 l	1,00	2,00
Pega tanque	1	2,81	2,81
Malla de plástico	1 m	2,25	2,25
Recipiente tipo gaveta	1	10,00	10,00
Llave de 1"	2	1,00	2,00
Codo polimex 1/2	4	1,65	6,60
Acople para tanque	2	1,50	3,00
Tubo económico 110mm	1 m	2,55	2,55
Conector T de plástico 1"	1	2,26	2,26
Teflón	1	0,35	0,35
Aserrín	26 cm	1,00	1,00
Piedra de río (270 x 220 mm)	13 cm	2,00	2,00
Grava sílica (1/4 a 1/2 mm)	13 cm	5,00	5,00
Carbón activado (0,25 mm)	13 cm	25,00	25,00
Lombrices	50	20,00	20,00
TOTAL			210,77

Para calcular el costo-beneficio del lombrifiltro, se consideraron los costos generados para cada proceso, así mismo los valores de cada uno de los materiales para el ensamble de la unidad experimental. Considerando a la materia prima como las lombrices *Eisenia foetida*, estas tuvieron un precio referencial de \$20,00 el cual es un valor general en el mercado actual.

La metodología empleada para el cálculo del costo de producción fue tomada de (Vinza, 2012), en donde se calculó el valor de la materia prima, la mano de obra directa y el gasto de producción, obteniendo como resultado lo siguiente:

$$CP = (\$210,77 + 40 + 0)$$

$$CP = \$ 250,77$$

El presupuesto requerido para la construcción del lombrifiltro a base de lombriz *Eisenia foetida* se valoró en 250,77 dólares americanos, con un tiempo de vida útil de 6-8 meses, pudiendo procesar un flujo volumétrico de $1,13 \times 10^{-1}$ l/s. Cabe recalcar que este valor representa el costo total para tratar 60 l de agua residual doméstica, ya que todos los tratamientos se llevaron a cabo en el mismo sistema, es decir, en un solo lombrifiltro, aplicando diferentes caudales y TRH.

Por tanto, resulta económicamente factible desarrollar este tipo de proyectos en zonas rurales que no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo así a la disminución de la contaminación de los cuerpos de agua, que son principalmente los más afectados por las descargas de contaminantes que proceden de las actividades humanas.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se obtuvo un caudal de agua residual doméstica con un promedio de $5,18 \text{ m}^3/\text{día}$, la cual, a través de los análisis de laboratorio, presentó una elevada concentración de materia orgánica en cuanto a SST y ST. Sin embargo, los parámetros de DBO₅ y DQO se encontraron por debajo del límite máximo permisible establecido en la Legislación Ambiental Ecuatoriana.
- Los diferentes caudales aplicados en el lombrifiltro influyeron significativamente en la eficiencia de remoción de materia orgánica, existiendo una variabilidad en el porcentaje de remoción de SST y ST. Mientras que la DBO₅ y DQO no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre un tratamiento y otro ya que el p-valor fue mayor a 0,05.
- El T₁, con un caudal de $1,8 \times 10^{-2}$ l/s y un TRH de 0,92 h obtuvo los mejores resultados de eficiencia, con medias de 52,25% para DBO₅ y DQO, 66,74 y 52,91% para SST y ST respectivamente, así como un pH y temperatura promedio de 6,8 y 22,3°C. Por esta razón, se identificó que mientras mayor es el TRH, aumenta la eficiencia de remoción de materia orgánica que posee el lombrifiltro.
- Mediante la relación costo beneficio se comprueba que la implementación de lombrifiltros a base de *Eisenia foetida* para la remoción de materia orgánica en aguas residuales domésticas, representa un sistema ideal para las zonas rurales, debido a sus características de eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad ecológica.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se debe realizar lavados periódicos a los lechos filtrantes del lombrifiltro para evitar la colmatación, y la aportación de sales al proceso de tratamiento. Asimismo, se debe limpiar frecuentemente las excretas de las lombrices con la finalidad de impedir el aumento de la turbidez del agua que desciende por las diferentes capas.
- Se sugiere caracterizar el humus de la *Eisenia foetida* para realizar correctos cambios de sustrato, retiro y disposición postratamiento del lombrifiltro.
- Como última recomendación y en base al costo del prototipo, dar continuidad al trabajo de investigación para su aplicación con otro tipo de agua residual, utilizando diferentes especies de lombrices para determinar su eficiencia en la remoción de materia orgánica y otros parámetros físicos, químicos y biológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, C., Solís, O., Villegas, O. & Cardoso, L. (2013). Precomposteo de residuos orgánicos y su efecto en la dinámica poblacional de *Eisenia foetida*. *Agronomía Costarricense*, XXXVII (1), 127-139. <http://www.redalyc.org/pdf/436/43628796010.pdf>
- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56
- Arango, J. (2003). *Evaluación ambiental del Sistema Tohá en la remoción de Salmonella en aguas servidas domésticas* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Argandoña, L., & Macías, R. (2013). *Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la parroquia Colón, cantón Portoviejo, provincia de Manabí* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador
- Baumgartner, R. (2013). Developing a testing protocol for Vermifiltration-based Onsite Wastewater Treatment Systems (VOWTS), pp 1–60.
- Brack, A. (2009). Manual para municipios ecoeficientes. Lima, PE.: Ministerio del Ambiente. Recuperado de http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/manual_para_municipios_ecoeficientes.pdf
- Cáceres, D., Calisaya, G., & Bedoya, E. (2018). Eficiencia de la lombriz roja californiana (*Eisenia Foetida*) en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*. 4(1), 13-23
- Caicedo, J. (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de Eisenia foetida y agave filifera, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca, Riobamba 2015* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
- Casas, F. (2009). *Caracterización de los Sistemas de Tratamiento de Riles en la Industria Lechera y Propuestas de Mejora* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile
- Chacón, M. (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua. Ediciones USTA
- Coronel, N. (2015). *Diseño e implementación a escala de un biofiltro Tohá en la ESPOCH para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Langos La Nube* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

- De Anda, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14(1), 119-143
- Durán, L., & Henríquez, C. (2009). Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 275-281
- Fernández, M., Rodríguez, S., & Terry, A. (2008). Principios para el diseño y aplicación de reactores anaerobios en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Tecnología Química*, 28(1), 65-69
- Filippín, J., Luna, S., Pozzi, T & Pérez, M. (2017). Obtención y caracterización de carbón activado a partir de residuos olivícolas y oleícolas por activación física. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(3), p. 59-71
- Gallegos, D. (2019). *Evaluación del lombrifiltro como tratamiento primario del sistema de tratamiento de aguas residuales del proyecto Manchay Verde* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Villa El Salvador, Perú.
- García, C., & González, A. (2000). *Tratado de pediatría social*. Madrid, España: Díaz de Santos, S.A
- García, Z. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
- Hernández, Y. (2005). *Anteproyecto de construcción para aplicación de Lombricultura al tratamiento de Planta Llau-Llao de Salmonera INVERTEC S. A.* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile
- Huiza, J., & Ordoñez, N. (2018). *Eficiencia de lombrifiltro implementando la técnica de pared caliente en el tratamiento de aguas residuales domésticas del centro poblado de Huaylacucho del distrito de Huancavelica* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú
- INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). (2013). Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2169:2013. Agua, Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras. <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/NTE-INEN-2169-AGUA.-CALIDAD-DEL-AGUA.-MUESTREO.-MANEJO-Y-CONSERVACION-DE-MUESTRAS.pdf>
- INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). (2013). Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2176:2013 Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo. EC. (En línea). Consultado el 20 de ene. 2020. Formato PDF. Disponible en

INEN-2176-AGUA.-CALIDAD-DEL-AGUA.-MUESTREO.-
T%C3%89CNICAS-DE-MUESTREO.pdf

- Jiménez, B. (2001). *La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada*. Ciudad de México, México: Limusa
- Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). Constructed wetlands for pollution control. *Scientific and technical report*, 1(8), 156
- Kumar, T., Rajpal, A., Arora, S., Bhargava, R., Prasad, K., & Kazmi, A. (2016). A comparative study on vermifiltration using epigeic earthworm *Eisenia fetida* and *Eudrilus eugeniae*. *Desalin Water Treat* 57(14), p 6347–6354
- Lima, J. (2016). Diseño, implementación y evaluación de un sistema de biofiltración con lombrices (*Eisenia foetida*) para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la crianza de cerdos en la propiedad de la familia Lima ubicada en el barrio Playas La Florida, cantón Yantzaza provincia de Zamora Chinchipe (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Zamora Chinchipe, Ecuador
- Limachi, E. (2018). Efecto de tres dosis de sustratos en la alimentación de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) con estiércol bovino y aserrín descompuesto en Sapecho, Alto Beni *Revista Apthapi*, 4(2), 11-36
- Loro, A. (2018). Evaluación de la eficiencia del tratamiento secundario de aguas residuales domésticas utilizando un biofiltro con *Eisenia foetida* y un biofiltro convencional (tesis de pregrado). Universidad Científica del Sur, Lima, Perú
- Loza, M., Choque, B., Pillco, H., Huayta, D., Chambi, I y Cutili, B. (2016). Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 1(4)
- Lozada, R., Ramos, E., Choqueneira, R., Argota, G., & Iannacone, J. (2019). Reducción de la demanda bioquímica de oxígeno en las aguas residuales mediante lumbifiltración. *Revista PAIDEIA*, 9(1), 4
- Madera, C., Silva, J., & Peña, M. (2005). Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales basados en tanque séptico - filtro anaerobio y humedales subsuperficiales. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2), 5-10.
- Manyuchi, M. M., Mupoperi, N., Mbohwa, C., & Muzenda, E. (2019). *Treatment of Wastewater Using Vermifiltration Technology. Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges*, 215–230. doi:10.1007/978-981-13-3179-4_12

- Martínez, J. (28 de febrero de 2014). Análisis de costo beneficio. Ejemplos de análisis sector privado. Costo-Beneficio. http://gis.jp.pr.gov/Externo_Econ/Talleres/PresentationCB_JP_ETI.pdf
- Mejía, A., Cabrera, M., & Carrillo, Y. (2017). Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala de laboratorio. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 26(2), 72-83
- Metcalf y Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Madrid, España: McGraw Hill
- Orozco, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales*. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Acodal
- Osorio, F., Torres, J., & Sánchez, M. (2010). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes. Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Madrid, España: Díaz de Santos, S.A
- Osorio, G., & Rodríguez, R. (2014). *Estudio de la influencia del tiempo de retención celular sobre la reducción de materia orgánica carbonácea y nitrógeno en una nueva configuración del sistema de estabilización por contacto tratando agua residual doméstica* (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia
- Paico, D. (2017). *Sistema Tohá, para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Cesar Vallejo* (tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Chiclayo, Perú
- Parra, I., & Chiang, G. (2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Gestión y Ambiente*, 16(3), 39-51
- Pérez, A. (2010). *Selección de sistema de tratamiento de aguas residuales para localidad de Santa Barbara usando metodología de decisión multicriterio AHP* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Pramanik, P., & Chung, Y. (2011). Changes in fungal population of fly ash and vinasse mixture during vermicomposting by *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida*: documentation of cellulase isozymes in vermicompost. *Waste Manag*, 1(31), 1169–1175
- Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 17(1), 71-80

- Ramón, J., León, J., & Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46-54
- Reina, J. (2015). *Evaluación de la eficiencia y cinética de remoción de materia orgánica en un reactor biológico aerobio horizontal con medio de soporte PET* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
- Reyes, J. (2016). Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. *Enfoque UTE*, 7(3), 41-56
- Robles, L., & López, A. (2017). *Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación* (tesis de pregrado). Universidad de La Salle Ciencia Unisalle, Bogotá, Colombia
- Rodríguez, E. (2017). *Análisis de grava como filtro en el tratamiento de aguas residuales proveniente de lavadora y lubricadora "RIDA" ubicada en la ciudad de Patate – Provincia de Tungurahua* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador
- Rojas, J., Rojas, A., & Vega, H. (2017). Evaluación de la eficiencia del sistema FIME en unidades de polipropileno utilizando lechos filtrantes alternativos. *El Centauro*, 12(1), 12
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., & Ortiz, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 157-167
- Saboya, X. (2018). *Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas en el Distrito de Chachapoyas-Amazonas* (tesis de pregrado). Universidad Peruana Unión, Lima, Perú
- Salazar, M. (2005). *Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile
- Sancho, F., Senante, M., & Garrido, R. (2010). Estudio de viabilidad económica para el tratamiento de aguas residuales a través de un análisis coste beneficio. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, (11), 1-25.
- Santos, A., & Oliveira, R. (2011). Tratamiento de aguas residuales fila horizontal porcina de reactor discontinuo secuencial anaeróbica aeróbica. *Ingeniería Agrícola*, 1(1), 781-794

- SEMLADES. (2017). Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017. Recuperado de <http://www.cancilleria.gob.ec>
- SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua). (20 de febrero de 2012). Diagnóstico de las estadísticas del agua en Ecuador. Quito: CEPAL. <https://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico%20de%20las%20Estadisticas%20del%20Agua%20Producto%20IIC%202012-2.pdf>
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. (2017). A mechanistic review on vermifiltration of wastewater: design, operation and performance. *J Environ Manag*, 1(1), 656–672
- Sinha, R., Bharambe, G., & Chaudhari, U. (2008). Sewage treatment by vermifiltration with the synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *Environmentalist* 28(4), 409–420
- Sosa, D., Viguera, J., & Holguín, E. (2014). La biofiltración: una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas residuales. *Vid supra Visión Científica*, 6(2), 56-60
- Tejada, A., Chura, E., & Apaza, H. (2018). Mejoramiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, modelo Rotoplas para familias del sector rural. *Revista científica de investigaciones ambientales*, 1(1), 43-54
- Trapote, A. (2013). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Recuperado de https://www.e-buc.com/portades/9788497172646_Fragment.pdf
- TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente). (2015). Acuerdo Ministerial 097-A. *Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA)*. R.O. No. 387. Anexo 1. Tabla 9. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>
- Valdez, R. (2013). Niveles de estiércol de bovinaza más cáscara de cacao en la producción de humus de lombriz (*Eisenia foetida*). Tesis, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ingeniería Agropecuaria, Quevedo. Obtenido de <http://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/537/1/T-UTEQ-0117.pdf>
- Vásquez, S. (2017). *Análisis de la eficiencia de un prototipo de Biofiltro en el tratamiento de aguas residuales para riego en Trapiche, Comas, 2017* (tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú
- Vinza, S. (2012). Propuesta para la aplicación del método de costeo por actividades abc (activity based costing) de la industria “gráficas olmedo”. Obtenido de Propuesta para la aplicación del método de costeo por actividades abc

(activity based costing) de la industria “gráficas olmedo” de la ciudad de Quito. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/165/1/T-UCE-0005-20.pdf>

- Xing, M., Li, X., & Yang, J. (2010). Treatment performance of small-scale vermifilter for domestic wastewater and its relationship to earthworm growth, reproduction and enzymatic activity. *African Journal of Biotechnology*, 9(44), 7513-7520
- Zapata, I., Martínez, L., Posada, E., González, E., & Saldarriaga, J. (2016). Efectos de la lombriz roja californiana (*Eisenia Foetida*), sobre el crecimiento de microorganismos en suelos contaminados con mercurio de Segovia, Antioquia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27 (1), 77-90

ANEXOS

ANEXO 1. Ubicación del sitio de muestreo.

1-A. Ubicación del lugar para el muestreo del agua residual doméstica.

ANEXO 2. Cálculo del volumen de agua residual doméstica.

ANEXO 3. Construcción del lombrifiltro.**3-A.** Tanque alimentador.**3-B.** Tubería de PVC para riego del agua.**3-C.** Válvula reguladora de caudal.**3-D.** Bases con orificios de las capas.**3-E.** Cajas de vidrio con malla Raschell.**3-F.** Reservorio de agua.

ANEXO 4. Estructura del lombrifiltro.

ANEXO 5. Lavado previo de lechos filtrantes del lombrifiltro.



5-A. Enjuague de los lechos filtrantes antes de su incorporación al lombrifiltro.

ANEXO 6. Instalación de capas filtrantes del lombrifiltro.



6-A. Incorporación del reservorio.



6-B. Incorporación de lombrices.



6-C. Capa de *Eisenia foetida* + aserrín



6-D. Capa de carbón activado.



6-E. Capa de grava.



6-F. Capa de piedra de río.



6-G. Instalación culminada.

ANEXO 7. Obtención de las lombrices (*Eisenia foetida*).**7-A.** Recolección de las lombrices en las camas de lombricultura de CIIDEA.**ANEXO 8. Adaptación de *Eisenia foetida* durante 10 días.****8-A.** Medición del porcentaje de humedad mediante prueba de puño.**8-B.** Observación del desarrollo de las lombrices.

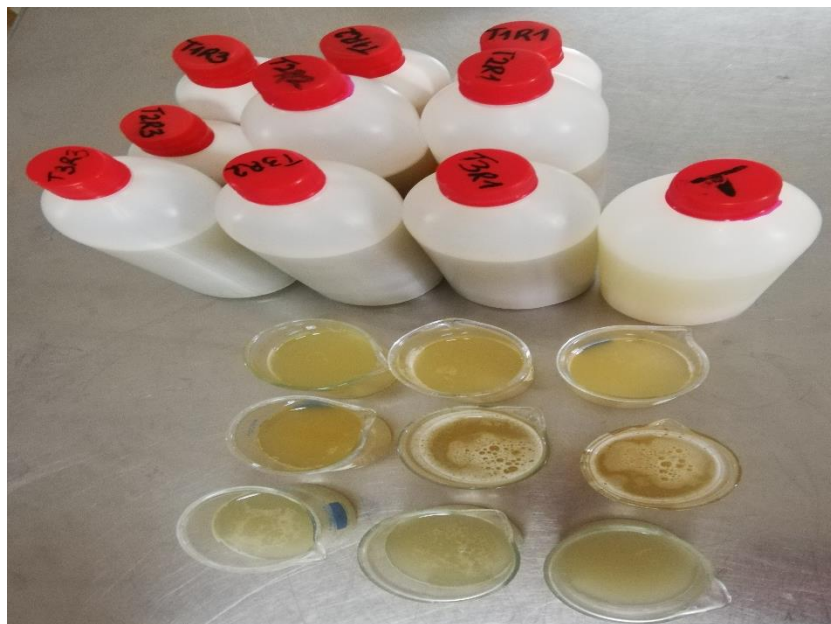
ANEXO 9. Caracterización del agua residual doméstica.**9-A. Determinación de temperatura.****9-B. Determinación de pH.****9-C. Determinación de sólidos.**

ANEXO 10. Análisis de resultados de DBO₅.

		RESULTADO DE ANÁLISIS DBO ₅						
Nombre del Solicitante:		Gustavo Castillo						
Fecha de entrega de muestras:		10/9/2020						
Fecha de análisis:		10/9/2020						
Condiciones de muestra:		Las muestras fueron entregadas en botellas de plástico blancas en cadena de frío a 4°C.						
Preparación de muestra:		Se colocó volumen respectivo de cada una de las muestras en las botellas para la determinación de DBO ₅						
Técnica utilizada:		OXI-TOP						
Responsable del análisis:		Genoveva Granda						
Límite máximo permisible*:		100 mg O ₂ /L						
		RESULTADOS DBO₅ mg O₂/L						
MUESTRA	VOLUMEN	DILUCIÓN	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	DBO mgO ₂ /L
T0	365 ml	2	28	29	29	32	37	74
T1R1	432 ml	1	35	36	36	36	36	36
T1R2	432 ml	1	34	35	34	34	34	34
T1R3	432 ml	1	35	36	36	36	36	36
T2R1	432 ml	1	35	36	36	36	36	36
T2R2	432 ml	1	35	36	36	36	36	36
T2R3	432 ml	1	35	36	36	36	36	36
T3R1	432 ml	1	30	36	36	36	36	36
T3R2	432 ml	1	36	37	37	37	37	37
T3R3	432 ml	1	35	37	37	36	36	36

Observaciones:

* Acorde a la Tabla 9: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. Norma de Calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso de Agua.

ANEXO 11. Agua residual doméstica después del tratamiento.**11-A.** Toma de muestras del agua residual doméstica tratada.**11-B.** Apreciación del agua residual doméstica tratada en los diferentes tratamientos.

ANEXO 12. Certificación de análisis y aprobación del uso de laboratorio de química ambiental.

Calceta, 1 de septiembre del 2020.

DRA. AIDA DE LA CRUZ BALÓN

DIRECTORA DE LA CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL DE LA ESPAM MFL

En su despacho. –

Por medio del presente se le reitera un cordial saludo de los estudiantes de décimo semestre "A" **CASTILLO SÁNCHEZ JONATHAN GUSTAVO** y **CHIMBO SOLÓRZANO JÉSSICA ESTEFANÍA**.

Nos dirigimos a usted para solicitar el permiso respectivo para ejecutar los análisis de sólidos disueltos totales, sólidos totales, pH y temperatura, en el laboratorio de Química Ambiental de la ESPAM MFL, desde el lunes 7 hasta el viernes 11 de septiembre, con el objetivo de realizar actividades programadas del trabajo de titulación: **"EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE LOMBRIFILTROS (*Eisenia foetida*) EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES"** tutorado por el Qf. Patricio Noles Aguilar.

Esperando contar con la aceptación debida, anticipamos nuestros sentimientos de agradecimiento y estima.

Atentamente,

CASTILLO SÁNCHEZ JONATHAN
CI. 1719827444

CHIMBO SOLÓRZANO JÉSSICA
CI. 1314592807



**ESPAMMFL**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ**LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y SUELOS****CERTIFICACIÓN**

Por medio de la presente certifico que **CASTILLO SÁNCHEZ JONATHAN GUSTAVO** con CI **1719827444** Y **CHIMBO SOLÓRZANO JESSICA ESTEFANIA** con CI **1314592807** egresados de la carrera de Ing. Ambiental de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "MFL", realizaron los análisis físicos-químicos (Sólidos suspendidos totales, Sólidos totales, pH, Temperatura) para llevar a cabo el proyecto de titulación "**EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE LOMBRIFILTROS (*Eisenia Foetida*) EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES**".

Prácticas que estuvieron supervisadas bajo el personal del laboratorio Química Ambiental y Suelos

Particular que me suscribe a usted para los fines legales pertinentes.

Atentamente

ING. FABIÁN PENARRIETA MACÍAS, MG.

TÉCNICO