

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

## **EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DEL USO DEL RAQUIS COMO LECHO FILTRANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIEROS AMBIENTALES**

**WENDY NATHALY SANGUCHO LOCHAMIN**  
swendynathaly@hotmail.com

**ABRAHAN DANIEL RODRIGUEZ ROMERO**  
abrahan.ar97@hotmail.com

**DIRECTOR: Ph.D ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR**  
ana.balarezo@epn.edu.ec

**Quito, Mayo 2018**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Wendy Sangucho y Abrahan Rodríguez, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

---

**WENDY NATHALY SANGUCHO  
LOACHAMIN**

---

**ABRAHAN DANIEL RODRIGUEZ  
ROMERO**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wendy Nathaly Sangucho Loachamin y Abraham Daniel Rodríguez Romero, bajo mi supervisión.

---

**Ph.D ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR  
DIRECTORA DEL PROYECTO DE  
TITULACIÓN**

## AGRADECIMIENTO

*“El agradecimiento es la memoria del corazón”*

*(Lao Tsé)*

A Dios por guiar mi camino, por darme esperanza en los momentos difíciles y llenarme de momentos de inmensa felicidad.

A mi mami y a mi papi por darme la vida, por aportar cada uno a su modo en mi formación estudiantil y personal, por mostrarme que siempre se puede ser mejor hija, mejor hermana, mejor ser humano. A mis hermanos, Alex, Mati e Isa que son los regalos más lindos que Dios pudo darme.

A mis amigas de la facultad, Johis, Vanelu, Belencita y Liz por compartir esta etapa llena de alegrías, preocupaciones, estrés y aventuras. A mis amigas del colegio, Daya, Gaby, Eve y Diana que me enseñaron a ver la vida de una forma diferente, porque aún a la distancia siento su cariño.

A Abrahan, por ser mi compañero y mejor amigo, por no dejar que la tristeza y preocupación me invadan, por brindarme su apoyo incondicional, cariño y alegría, gracias por terminar conmigo lo que empezamos hace años.

A mis compañeros del grupo de danza, por compartir conmigo una de las grandes pasiones de mi vida, en especial a Erikita y a Óscar Paúl, gracias por acompañarme en mis locuras. A todas las personas que con su cariño, preocupación y apoyo me han impulsado a no darme por vencida.

A la Ing. Ana Lucía Balarezo, nuestra directora de tesis, por confiar en nuestras capacidades y siempre estar dispuesta a brindarnos su guía. Finalmente, a la Escuela Politécnica Nacional por permitirme hacer realidad uno de mis sueños, estudiar en esta noble institución.

*Wendy*

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres que me brindaron el discernimiento, por ser mi ejemplo de superación, por enseñarme a ser un hombre íntegro. A mis abuelos, por gestar en mí el amor por la naturaleza. A mis hermanos por ser el motor de mi vida, por el cariño brindado en el hogar, teniendo una infancia y adolescencia llena de ruido hogareño.

A mis amigos, todos los que me conocen saben que sin ellos no soy nada, gracias por tantas conversaciones, por hacer más fácil mi vida, gracias Julián, Fidel, Andrés, Vanessa, Johanna, Lizbeth, Belén y tantos que me faltan nombrar.

A mi mejor amiga y la compañera ideal Wendy, siempre ha sido mi apoyo en todo aspecto, sin ti este logro hubiese sido imposible, espero seguir siempre crecer intelectualmente juntos amiga.

A todos los docentes que he llegado a respetar, que me han servido de admiración y guía para mi ámbito laboral, porque de ellos he mimetizado su pasión hacia impartir un nuevo conocimiento, agradezco de manera especial por la acertada dirección de Ana Lucía, profesora que siempre se ha mantenido presta a cualquier requerimiento de esta tesis.

A los establecimientos de mi bella universidad, de ella me llevo muchas risas, lágrimas, triunfos, decepciones, pero sobre todo una identidad politécnica.

**ABRAHAN** 😊

## DEDICATORIA

*La vida es de valientes, no te queda más que seguir*

A mi mami, el mejor ser humano que conozco, a una mujer de infinita bondad, de fortaleza extraordinaria y la mejor amiga. Gracias por depositar tanta confianza en mí, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado, por enseñarme que en la vida no todo es malo, ni todo es bueno, por mostrarme que la gente buena recibe cosas buenas y que sin importar lo que los demás piensen, siempre debo estar orgullosa de lo que he logrado, de lo que hemos logrado.

Este logro es reflejo del excelente trabajo que como madre ha realizado, porque con paciencia me ha enseñado que nada es imposible y que la única forma de ser completamente libre es estudiando. Porque nunca dejó que dude de mi capacidad para lograr mis metas, por impulsarme a siempre luchar. Las palabras no son suficientes para agradecer todo lo que ha hecho no solo por mí, sino también por mis hermanos. Gracias por ser razón y motivo para todos mis logros, por ser apoyo para mis sueños, por ser fuerza en mis caídas.

*Wendy*

## **DEDICATORIA**

A mi madre, este triunfo te lo dedico enteramente a ti, has sido la mujer más fuerte y ahora tu primogénito te dedica el primero logro, conozco que dejaste a tu familia, a tus amigos a tus recuerdos para mudarte a una ciudad completamente ajena para brindarnos una mejor oportunidad de estudio. Porque a pesar de ser una familia numerosa y humilde tuviste el coraje de sacarnos adelante, de siempre estar presta al trabajo extenso, por enseñarme las matemáticas, la lectura desde una temprana edad. Te amo madre, felicitaciones el primer logro académico, espero te sientas muy orgulloso de mi.

Debería incluir a mi padre esta dedicatoria, pero aún tengo más metas y sueños que deben ser dedicados a ustedes, gracias por todo...

**ABRAHAN** 😊

## CONTENIDO

DECLARACIÓN -----	I
CERTIFICACIÓN -----	II
AGRADECIMIENTO -----	III
AGRADECIMIENTO -----	IV
DEDICATORIA -----	V
DEDICATORIA -----	VI
CONTENIDO -----	VII
ÍNDICE DE FIGURAS -----	XI
ÍNDICE DE TABLAS -----	XIII
RESUMEN -----	XIII
ABSTRACT -----	XV
PRESENTACIÓN -----	XVI
CAPÍTULO I -----	18
1. ASPECTOS GENERALES -----	18
1.1 INTRODUCCIÓN -----	18
1.2 JUSTIFICACIÓN -----	20
1.3 OBJETIVOS -----	22
1.3.1 OBJETIVO GENERAL -----	22
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS -----	22
1.4 ALCANCE -----	22
CAPÍTULO II -----	24
MARCO TEÓRICO -----	24
2.1 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA -----	24
2.1.2 ESTERILIZACIÓN -----	24
2.1.3 DESFRUTADO -----	24



2.1.4	DIGESTIÓN-----	25
2.1.5	PRENSADO -----	25
2.1.6	SEDIMENTACIÓN Y DESARENADO -----	25
2.1.2	TAMIZADO-----	25
2.1.2	CLARIFICACIÓN-----	27
2.1.3	DESHIDRATACIÓN -----	27
2.1.4	CICLONADO Y TAMIZADO DE LODOS -----	27
2.1.5	CENTRIFUGADO DEL LODO ACEITOSO -----	27
2.1.2	SEPARACIÓN NEUMÁTICA DE FIBRA -----	27
2.2	DESECHOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA -----	27
2.2.1	DESECHOS SÓLIDOS-----	28
2.2.2	DESECHOS LÍQUIDOS-----	29
2.2.3	EMISIONES GASEOSAS-----	32
2.3	DESCRIPCIÓN DEL RAQUIS-----	33
2.4	BIOFILTRACIÓN-----	34
2.4.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN BIOFILTRO -----	35
2.4.2	TIPOS DE BIOFILTROS -----	36
	3.2.2.1 Biodisco rotatorio -----	36
	3.2.2.2 Biofiltros sumergidos-----	37
	3.2.2.3 Biofiltros percoladores-----	38
	3.2.2.4 Biofiltros sobre materiales orgánicos. -----	40
2.5	MARCO LEGAL APLICABLE -----	41
	CAPÍTULO III-----	43
	METODOLOGÍA -----	43
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL -----	43
3.1.1	ORIGEN DEL AGUA RESIDUAL -----	43
3.1.2	PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN -----	44

3.2	PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RAQUIS COMO LECHO FILTRANTE-----	44
3.2.1	ACONDICIONAMIENTO DEL RAQUIS-----	44
3.2.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL RAQUIS ACONDICIONADO-----	46
	3.2.2.1 Humedad -----	46
	3.2.2.2 Tasa de infiltración -----	47
	3.2.2.3 Porosidad -----	49
3.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO-----	51
3.3.1	MATERIALES -----	51
3.3.2	DIMENSIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS -----	51
	3.3.2.1 Altura, área y volumen -----	51
	3.3.2.2 Carga hidráulica-----	52
	3.3.2.3 Carga orgánica-----	53
3.3.2	ENSAMBLAJE Y PUESTA EN MARCHA DE LOS BIOFILTROS-----	53
3.4	MONITOREO DE LOS BIOFILTROS-----	54
	CAPÍTULO IV -----	56
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	56
4.1	ANÁLISIS DE LAS CARACTERSTICAS DEL RAQUIS ACONDICIONADO -----	56
4.2	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL -----	56
4.3	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LOS BIOFILTROS Y DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL EFLUENTE TRATADO -----	58
4.3.1	SÓLIDOS SEDIMENTABLES-----	58
4.3.2	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES -----	59
4.3.3	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES -----	60
4.3.4	SÓLIDOS TOTALES -----	62

4.3.5	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO -----	63
4.3.6	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO -----	65
4.3.7	GRASAS Y ACEITES -----	66
4.3.8	POTENCIAL DE HIDRÓGENO-----	68
4.4	COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS ALCANZADAS -----	70
4.4.1	EFICIENCIA DE LOS BIOFILTROS SEGÚN EL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE-----	70
4.4.2	BIOFILTRO MÁS EFICIENTE -----	71
4.5	GRADO DE CUMPLIMIENTO CON LA NORMATIVA AMBIENTAL -----	72
	CAPÍTULO V -----	74
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.-----	74
5.1	CONCLUSIONES -----	74
5.2	RECOMENDACIONES-----	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	77
	ANEXOS -----	80
	ANEXO N°1 -----	81
	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE TRATADO-----	81
	ANEXO N°2 -----	90
	SOLICITUD DIRIGIDA AL GERENTE GENERAL DE NEGCORPBIS S.A. EMPRESA AGROINDUSTRIAL -----	90
	ANEXO N°3 -----	92
	REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN CAMPO Y EN EL LABORATORIO-----	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA .....	26
FIGURA 2.2: COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA .....	28
FIGURA 2.3: COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL EFLUENTE RESIDUAL DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA DE LA PLANTA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO.....	30
FIGURA 2.4: FLUJOGRAMA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA .....	32
FIGURA 2.5: ESTRUCTURA DEL RAQUIS.....	34
FIGURA 2. 6: COMPONENTES DE UN BIOFILTRO.....	35
FIGURA 2.7: ESTRUCTURA DE LA BIOPELÍCULA.....	36
FIGURA 2.8: ESQUEMA DE UN BIODISCO ROTATORIO .....	37
FIGURA 2.9: ESQUEMA DE UN BIOFILTRO SUMERGIDO.....	38
FIGURA 2.10: ESQUEMA DE UN BIOFILTRO PERCOLADOR.....	39
FIGURA 2.11: ESQUEMA DE BIOFILTRO SOBRE CAMA DE TURBA .....	40
FIGURA 3.1: UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO. ....	43
FIGURA 3.2: ETAPAS DEL ACONDICIONAMIENTO DEL RAQUIS.....	45
FIGURA 3.3: PRUEBA DE INFILTRACIÓN DE ANILLO SIMPLE.....	47
FIGURA 3.4: ENSAYO DE TASA DE INFILTRACIÓN.....	49
FIGURA 3.5: ENSAYO DE POROSIDAD .....	50
FIGURA 3.6: SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN.....	54
FIGURA 4.1: EFICIENCIA DE LOS BIOFILTROS PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES .....	58
FIGURA 4.2: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES .....	60

FIGURA 4.3: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES.....	61
FIGURA 4.4: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA SÓLIDOS TOTALES .....	63
FIGURA 4.5: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO .....	64
FIGURA 4.6: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO .....	65
FIGURA 4.7: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA ACEITES Y GRASAS.....	67
FIGURA 4.8: COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO .....	69
FIGURA 4.9: INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL LECHO PARA LA GRANULOMETRÍA 1 .....	70
FIGURA 4.10: INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL LECHO PARA LA GRANULOMETRÍA 2 .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LODO EN BASE SECA.....	29
TABLA 2.2: ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA DE LA PLANTA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO.....	30
TABLA 2.3: CARACTERIZACIÓN FÍSICA QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA PLANTA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO.....	31
TABLA 2.4: EMISIONES GASEOSAS EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA .....	33
TABLA 2.5: LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE .....	41
TABLA 3.1: MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS .....	44
TABLA 3.2: GRANULOMETRÍA DEL RAQUIS ACONDICIONADO.....	45
TABLA 3.3: HUMEDAD DE RAQUIS CONDICIONADO .....	47
TABLA 3.4: TASA DE INFILTRACIÓN DEL RAQUIS ACONDICIONADO.....	49
TABLA 3.5: ENSAYOS PARA DETERMINAR POROSIDAD.....	50
TABLA 3.6: DIMENSIONES Y COMPONENTES DE LOS BIOFILTROS .....	52
TABLA 3.7: CRONOGRAMA DE MONITOREO.....	55
TABLA 4.1: CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL RAQUIS ACONDICIONADO .....	56
TABLA 4.2: CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y BIOLÓGICA DEL AGUA RESIDUAL DE PALMAR DEL RÍO, 2017 .....	57
TABLA 4.3: RESUMEN DE LAS EFICIENCIAS ALCANZADAS POR LOS BIOFILTROS .....	72
TABLA 4.4: PONDERACIÓN DE LA EFICIENCIAS.....	72

## RESUMEN

El presente trabajo evaluó la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante, mediante la construcción de biofiltros a escala de laboratorio, para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma.

Inicialmente, se caracterizó el agua residual a tratarse, obteniendo valores que sobrepasaban más de 200 veces los límites permisibles de descarga a cuerpos de agua dulce, como lo determina la normativa ambiental vigente del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Seguidamente, se ensambló un sistema de seis biofiltros percoladores, para lo cual se consideraron como variables: 1) la granulometría del raquis acondicionado y 2) el espesor del lecho filtrante. Además, se monitoreó su funcionamiento por un periodo de 10 semanas, durante las cuales se realizó el muestreo del efluente tratado dos veces por semana, con el fin de determinar la eficiencia del tratamiento biológico. En las muestras tomadas se analizaron ocho parámetros físicos, químicos y biológicos.

El análisis de resultados mostró que la eficiencia del tratamiento del agua residual alcanzada por el biofiltro más eficiente (Biofiltro 3), obtuvo valores de: 100,00% en sólidos sedimentables, 99,85% en sólidos suspendidos totales, 85,80% en sólidos disueltos, 91,50% en sólidos totales, 86,57% en DBO y DQO y 99,44% en grasas y aceites. Además, se observó un incremento del pH de 3,00 a 4,75. Sin embargo, solamente los parámetros de sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y grasas y aceites, alcanzaron valores permisibles en la normativa.

## **ABSTRACT**

The present study evaluated the use viability of raquis as a filter bed, through the construction of biofilters at laboratory scale, for the treatment of residual water coming from the palm oil extraction.

Initially, the residual water to be treated was characterized, obtaining values that exceeded more than two hundred times the permissible limits for discharges to freshwater bodies, as stipulated the current environmental regulations of Book VI of the Unified Text of Secondary Legislation of the Ministry of the Environment. Next, a system of six trickling biofilters was assembled, for which were considered two variables: 1) the granulometry of the conditioned raquis and 2) the thickness of the filter bed. In addition, its operation was monitored for a period of 10 weeks, during which the effluent was sampled twice a week, in order to determine the efficiency of the biological treatment. In the samples taken, eight physical, chemical and biological parameters were analyzed.

The analysis of results showed that the efficiency in the removal of pollutants from the most efficient biofilter (Biofilter 3), reached values of: 100.00% in settleable solids, 99.85% in total suspended solids, 85.80% in dissolved solids , 91.50% in total solids, 86.57% in BOD and COD and 99.44% in fats and oils. In addition, an increase in pH from 3.00 to 4.75 was observed. However, only the parameters of settleable solids, total suspended solids and fats and oils, reached permissible values in the regulations



## **PRESENTACIÓN**

El presente trabajo comprende diferentes etapas de experimentación, con el fin de determinar la viabilidad de uso del raquis como lecho filtrante para tratar el agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma. El detalle de dichas etapas se presenta en los capítulos detallados a continuación:

El primer capítulo contiene una breve introducción del trabajo, donde se manifiesta la importancia de la actividad aceitera en el país, la generación del efluente residual, breves características del mismo y el tratamiento tradicional que recibe. Así mismo, se presenta el planteamiento del problema, alcance, justificación y objetivos propuestos para el desarrollo del trabajo.

El capítulo dos comprende el marco teórico, donde se expone por una parte, el proceso de extracción de aceite de palma, los desechos generados y se presenta la descripción del raquis. Por otra parte, se recopila las características y el principio de funcionamiento de la biofiltración, así como los tipos de biofiltros, haciendo hincapié en los biofiltros percoladores y los biofiltros sobre materiales orgánicos. Finalmente, se presenta el Marco Legal aplicable para descargas a cuerpos de agua dulce.

El tercer capítulo describe la metodología, la cual puntualiza, el origen de las muestras, tanto de raquis como de agua residual, los parámetros físicos, químicos y biológicos de interés para este trabajo, cómo fue acondicionado el raquis para usarlo como lecho filtrante, así como el diseño, construcción, puesta en marcha y monitoreo de los biofiltros.

El cuarto capítulo presenta la discusión de resultados obtenidos antes, durante y después del tratamiento del efluente residual. También, se muestra la eficiencia alcanzada por los biofiltros en la remoción de los contaminantes de interés. Además, se hace un análisis de la influencia de la granulometría y espesor del lecho en la

eficiencia alcanzada y finalmente se verifica el grado de cumplimiento con la normativa ambiental vigente.

El capítulo cinco contiene las conclusiones y recomendaciones, que muestran de forma resumida, los resultados y observaciones relevantes, obtenidos durante el desarrollo de la experimentación.

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El Ecuador ocupa el segundo lugar a nivel regional en la producción de aceite de palma, siendo Colombia el primero y Honduras el tercero. A escala global, los países destacados en esta actividad industrial son Malasia e Indonesia, países que en el 2013 abarcaron el 85% de la producción mundial, mientras que Ecuador alcanzó el 0,9% de participación en el mismo año (PRO ECUADOR, 2014).

Según la Fundación de Fomento de Exportaciones de Aceite de Palma (FEDAPAL, 2014), la superficie sembrada de palma aceitera abarca aproximadamente 280 000 ha, es decir, representa el 4,2% del área total destinada a la producción agropecuaria del país y el 17% del total de cultivos principales. En el 2013 se registró una producción de 500 000 t, el consumo nacional fue de 215 000 t y el remanente se consignó a la exportación. El precio local por tonelada métrica tuvo un valor promedio de USD 633 y un precio internacional de USD 700,19 hasta el 2016 (CFN, 2017).

La inversión total en el sector es de aproximadamente USD 1 830 millones, de este monto, el 69% es dedicado al cultivo de palma (USD 1 260 millones), abasteciendo de materia prima a cerca de 40 extractoras que operan en el país. La inversión en la extracción de aceite de palma representa el 14% del total (USD 250 millones) y el restante 17% es destinado a las industrias productoras de aceites y grasas (USD 320 millones). La palma aceitera abarca 7 000 Unidades de Producción Agrícola (UPAs), de las cuales, el 87% tienen un área inferior a 50 ha, es decir, es un cultivo social que genera 51 000 empleos directos y 100 000 empleos indirectos. Además, el aporte económico de la palma de aceite al PIB del sector agrícola es del 4,53 % y 0,79% del PIB nacional (MAGAP, 2013).

El aceite crudo de palma, está compuesto por una fracción sólida (estearina) y una fracción líquida (oleaina), diferenciándolo de otros productos oleos vegetales. Esta variedad de aceite posee un alto contenido de compuestos antioxidantes como:

vitamina E, tocoferoles, tocotrienoles y  $\beta$ -caroteno, los cuales en el metabolismo actúan como agentes que previenen la acción del envejecimiento, contribuyen a la pérdida de grasa, combate las cardiopatías y visto desde un enfoque energético, el aceite de palma es el más consumido a nivel mundial (PRO ECUADOR, 2014).

La industria extractora de aceite de palma, ha resultado un negocio rentable en el país, tal impacto ha generado, que actualmente Ecuador es considerado el segundo productor a escala regional (Potter, 2011). Sinérgicamente, el biotopo ecuatoriano ofrece características que ayudan a la producción de la palma aceitera, como son la temperatura promedio (22°C) y la precipitación (2500 mm), es por eso, que esta industria ha permanecido con fuerza en el comercio nacional desde 1968 (MAGAP, 2015).

Las operaciones unitarias de la extracción de aceite de palma demanda gran cantidad de agua generando así, un importante efluente de líquido residual, caracterizado por una alta concentración de materia orgánica, grasas, aceites y sólidos totales, que al ser descargados directamente al ambiente generan un alto impacto negativo (Narvéez Guerrero, 2015). Adicionalmente, durante el procesamiento de una tonelada de racimos de fruto fresco (RFF), el 22% en peso sale como residuo sólido llamado "raquis". Este residuo es el esqueleto celulósico donde se ubican las frutas a manera de racimo, se caracteriza por tener una gran dureza y está formado por un tronco central y varias ramificaciones a manera de puntas (Páliz Hidalgo, 2014).

Las aguas residuales generalmente son tratadas en un sistema de lagunas, las cuales se saturan rápidamente a consecuencia del alto contenido de sólidos. Empíricamente, la empresa Palmar del Río, ubicada en la parroquia San José de Guayusa, cantón Francisco de Orellana, provincia Orellana, dedicada a la extracción de aceite de palma, ha venido utilizando el raquis como barrera física de retención de sólidos, evidenciándose cualitativamente una disminución considerable de los mismos en el efluente residual. Adicionalmente, existe información sobre el uso de materiales orgánicos como lecho filtrante, por ejemplo, turba, astillas de madera y cortezas de coníferas, que han alcanzado eficiencias de tratamiento superiores al

90% en parámetros como: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes y aceites y grasas (Garzón Zúñiga, Buelna, & Moeller Chávez, 2012).

El presente trabajo pretende evaluar la viabilidad de uso del raquis como lecho filtrante, para lo cual se propone la construcción y monitoreo de un sistema de biofiltros introduciendo como variables: 1) granulometría y 2) espesor del lecho. Finalmente, se debe recalcar que no existen precedentes sobre el uso del raquis en biofiltros, lo cual abre un campo de estudio enfocado al reciclaje interno de residuos en el tratamiento de agua residual antes de su descarga al cuerpo receptor.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Los procesos industriales generan importantes efluentes residuales que necesitan ser tratados antes de su descarga al cuerpo receptor. La falta de responsabilidad ambiental y conocimiento técnico ha ocasionado que se vierta el residuo líquido sin tratar o parcialmente tratado, generando problemas de degradación ambiental (Reyes, 2016). La creciente contaminación de los cuerpos hídricos crea la necesidad de optar por tratamientos alternativos que mejoren la calidad del agua antes de ser descargada, es decir, todo sujeto de control está obligado a lograr un desempeño ambiental aceptable (Bonomie & Reyes , 2012).

En el caso de la extracción de aceite de palma, la estabilización de las aguas residuales se realiza principalmente con sistemas de tratamientos de tipo biológico mediante lagunas de estabilización aerobias o anaerobias (Narváz Guerrero, 2015). Los parámetros de control que se evalúan en este tipo de sistemas son de tipo físico, químico y biológico, como: DQO, DBO, alcalinidad, pH, temperatura, acidez, sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SSed), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), nutrientes y grasas y aceites (CENIPALMA, 1996). Sin embargo, la elevada concentración de sólidos hace que las piscinas se saturen rápidamente, haciendo poco eficiente el tratamiento.

En respuesta a la problemática mencionada surge la idea de aplicar una tecnología de tipo pasivo como lo es la biofiltración, sobre una cama de material orgánico para tratar las aguas residuales de esta industria. En estudios realizados con turba, astillas de madera y cortezas de coníferas, se han obtenido eficiencias de tratamiento superiores al 90% en parámetros como DQO, DBO, SST, nutrientes y aceites y grasas (Garzón Zúñiga, Buelna, & Moeller Chávez, 2012).

Con estos antecedentes, el trabajo, comprende un estudio pionero que incluye la utilización del raquis como lecho filtrante, estableciendo un proceso de preparación y caracterización del mismo y se evaluó la eficiencia del material acondicionado para la remoción de la carga contaminante del efluente residual proveniente de la extracción de aceite de palma, a fin de determinar la viabilidad de su uso.

La metodología a utilizarse es la construcción de biofiltros a escala de laboratorio, misma que permitirá tener un ambiente controlado, lo que beneficia la obtención de datos confiables, pues se evita la influencia de factores externos y se fundamenta en la facultad que tienen ciertos medios orgánicos, para retener una gran variedad de sustancias contaminantes a través de mecanismos de adsorción, absorción y favorece la implantación de microorganismos capaces de biodegradar los contaminantes (Garzón Zúñiga, Buelna, & Moeller Chávez, 2012).

La ventaja de esta tecnología es que permite introducir variables como el espesor del lecho y la granulometría del material, con el fin de comprobar la factibilidad de su uso en el tratamiento de agua residual y la eficiencia que se podría alcanzar. Además, el uso de un material residual reduce los costos de implementación. Finalmente, la evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos del afluente y efluente, seguirá los lineamientos establecidos en la normativa vigente y en métodos estandarizados.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante, mediante la construcción de biofiltros a escala de laboratorio, para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el efluente residual, mediante la cuantificación de parámetros físicos y químicos, para definir una línea base.
- Experimentar con varias granulometrías y espesores de lecho, mediante la construcción de varios biofiltros, para determinar la influencia de dichos parámetros en la eficiencia del tratamiento.
- Determinar la eficiencia de tratamiento mediante la cuantificación de parámetros físicos y químicos del efluente tratado para confirmar la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante.

## **1.4 ALCANCE**

La concentración elevada de contaminantes en aguas residuales descargadas a cuerpos receptores como ríos, sobrepasa la capacidad autodepuradora de los mismos. Con el fin de dar solución a esta problemática se han estudiado tratamientos alternativos haciendo uso de materiales biológicos, por lo tanto, se cree que el raquis podría ser utilizado como lecho filtrante

El alcance del presente trabajo consiste en cuantificar la eficiencia del raquis en la remoción de materia orgánica, sólidos totales y grasas y aceites, impulsando una adecuada gestión de las aguas residuales. Para lo cual, se construirá un sistema de seis biofiltros con las variables de granulometría y espesor del lecho, aportando condiciones convenientes para que ocurran procesos biológicos que facilitan la remoción de estos contaminantes.

El uso del raquis como lecho filtrante, permite explorar nuevas alternativas para el tratamiento del efluente residual de este proceso industrial. Además, se está utilizando un material de desecho, lo cual permite darle un fin útil al raquis, contribuyendo a la disminución de la contaminación ambiental. Finalmente, debido a que no existen antecedentes sobre este uso del raquis, la información generada servirá de base para próximos estudios.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA**

El aceite de palma se obtiene de la pulpa del fruto de la palma y aporta entre el 18-26% del peso fresco de un racimo. Previo a su refinación, se considera que es el alimento más rico en vitamina A, pero durante el proceso de refinado pierde propiedades nutricionales y la calidad de sus ácidos grasos (Balboa Acero, 2015).

En general, la eficiencia de las industrias extractoras de aceite esta entre el 90 y 93 %, dependiendo de la maquinaria y del control del proceso (Narváez Guerrero, 2015). La extracción de aceite de palma comprende varias etapas, que inicia con la recolección de los RFF en el campo y la recepción de los mismos en la industria extractora, para dar inicio a su procesamiento, como puede verse en la Figura 2.1.

##### **2.1.2 ESTERILIZACIÓN**

Permite la limpieza de los racimos de fruto fresco (RFF) por remoción de materia ajena al fruto, para ello los RFF son autoclavados con vapor seco a una presión de 2.8 bar, por aproximadamente 40 a 60 min, alcanzando una temperatura de 145 °C. Además, sirve para inhibir la acción de las enzimas que degradan el fruto, facilitar la separación del fruto del raquis y acondicionar el fruto para la extracción del aceite. En esta operación se genera un condensado con alto contenido de materia orgánica (PRO ECUADOR, 2014).

##### **2.1.3 DESFRUTADO**

Permite la separación de los frutos del raquis una vez que los RFF son esterilizados; éstos son llevados a la tolva del tambor desfrutador, que gira a una velocidad entre 21 y 24 rpm. Los frutos abandonan el tambor a través de las ranuras longitudinales y son llevados, mediante un elevador al proceso de digestión. Los raquis en cambio se descargan a una banda transportadora, que los conduce hasta un sitio de almacenamiento temporal, posteriormente son llevados al campo y se los utiliza como

abono, porque poseen un alto contenido de potasio, nitrógeno y materia orgánica (Narváez Guerrero, 2015)

#### **2.1.4 DIGESTIÓN**

Permite la separación del mesocarpio del fruto y la nuez, dejando expuestas las vacuolas de aceite para facilitar su extracción. Los frutos esterilizados son digeridos, en un cilindro con brazos agitadores rotatorios. En este proceso se inyecta vapor para mantener la masa interna a una temperatura de 80°C, disminuyendo la densidad del aceite y favoreciendo la extracción (Muñoz Perreño, 2016).

#### **2.1.5 PRENSADO**

El fruto macerado pasa a las prensas de doble tornillo, que ejerce la presión adecuada para extraer la mayor cantidad de aceite. En esta operación unitaria se obtiene una fase líquida o colada que se descarga en el tanque de sedimentación y desarenado y una fase sólida o torta que se descarga por un transportador secador, hacia la separación neumática de fibra y nuez. En este proceso es necesaria la inyección de agua de dilución para lavar la fibra y extraer el aceite con mayor facilidad (Narváez Guerrero, 2015).

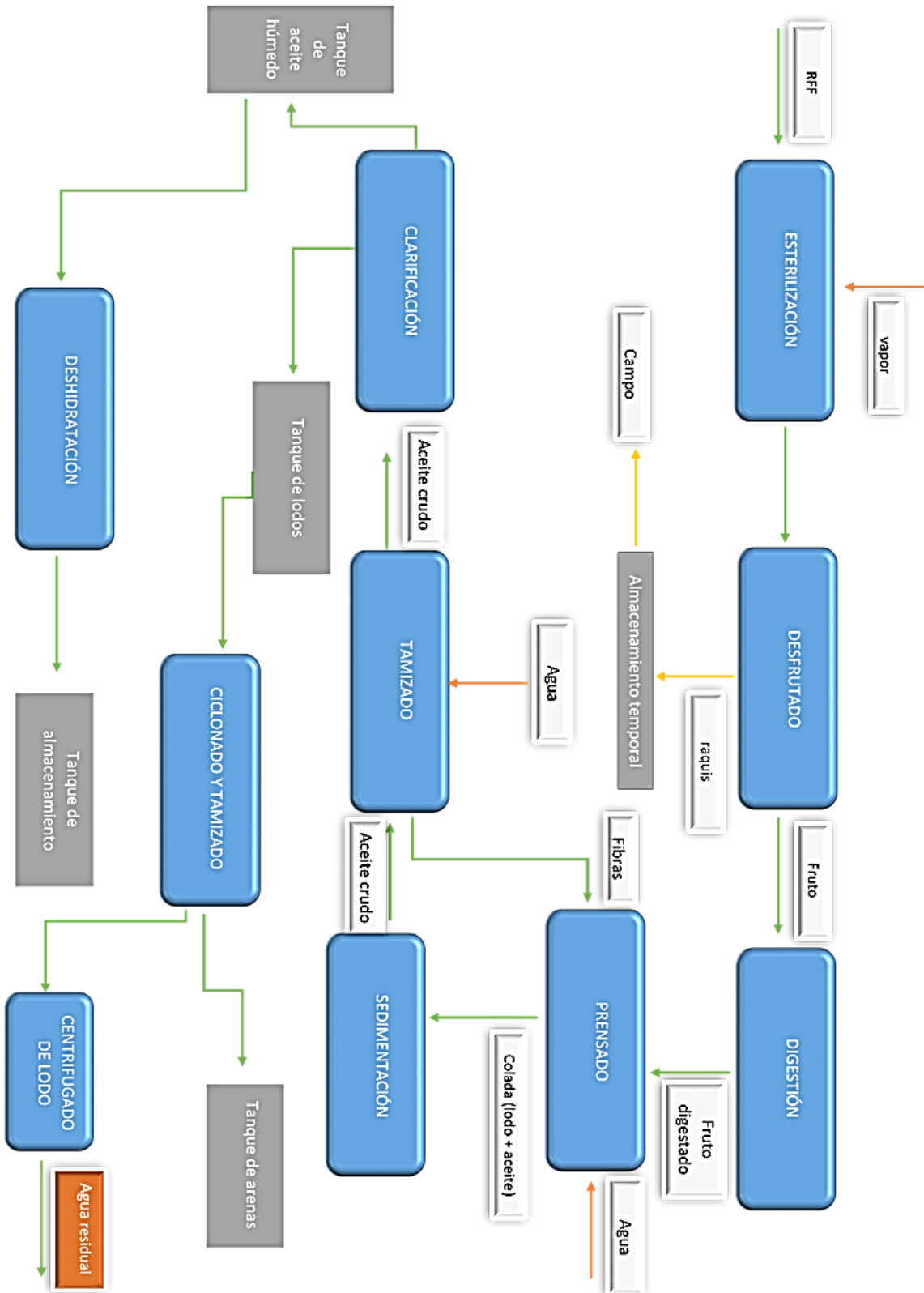
#### **2.1.6 SEDIMENTACIÓN Y DESARENADO**

La colada es llevada al tanque de sedimentación de aceite crudo, donde se retienen las partículas sólidas más pesadas. El aceite crudo sobrenadante se recupera por la parte superior y el lodo (sólidos, agua y pequeñas cantidades de aceite) precipita en el fondo del tanque (Muñoz Perreño, 2016).

#### **2.1.2 TAMIZADO**

Facilita la retención de la mayor cantidad de fibra contenida en el aceite crudo para incrementar la eficiencia de separación en el tanque clarificador. En esta operación unitaria es necesario agregar agua que cumple dos funciones: 1) limpiar la malla y 2) incrementar la dilución del aceite crudo. Las fibras retenidas regresan al proceso de prensado (Narváez Guerrero, 2015).

**FIGURA 2.1: FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA**



### **2.1.2 CLARIFICACIÓN**

Permite retirar impurezas sólidas y líquidas del aceite crudo a través de precipitación. Esta operación se realiza a 95°C, para disminuir la viscosidad del aceite y facilitar la separación de la fase líquida. El aceite húmedo se descarga a un tanque de almacenamiento para su purificación y secado y las impurezas son bombeados a otro tanque (Bonomie & Reyes , 2012).

### **2.1.3 DESHIDRATACIÓN**

El aceite húmedo es bombeado a través de un intercambiador de calor y un secador de bandejas, obteniendo un aceite libre de humedad, el cual es almacenado en los tanques de distribución para su venta (NEGCORPBIS S.A., 2012).

### **2.1.4 CICLONADO Y TAMIZADO DE LODOS**

El lodo es bombeado hacia el ciclón desarenador, que separa las arenas gruesas y el lodo liviano. Posteriormente, este lodo es llevado a un filtro rotativo para separar las fibras y la fase oleosa (NEGCORPBIS S.A., 2012).

### **2.1.5 CENTRIFUGADO DEL LODO ACEITOSO**

La fase oleosa es centrifugada obteniendo un efluente residual que es descargado a los florentinos, de dónde es recirculado para recuperar la mayor cantidad de aceite (NEGCORPBIS S.A., 2012).

### **2.1.2 SEPARACIÓN NEUMÁTICA DE FIBRA**

Tiene como función separar el material liviano (fibra, trozos de almendra y cáscara) y el material pesado (nueces). El material liviano sirve de combustible para la generación de vapor, mientras que, la fase pesada cae al tambor pulidor (Muñoz Perreño, 2016).

## **2.2 DESECHOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA**

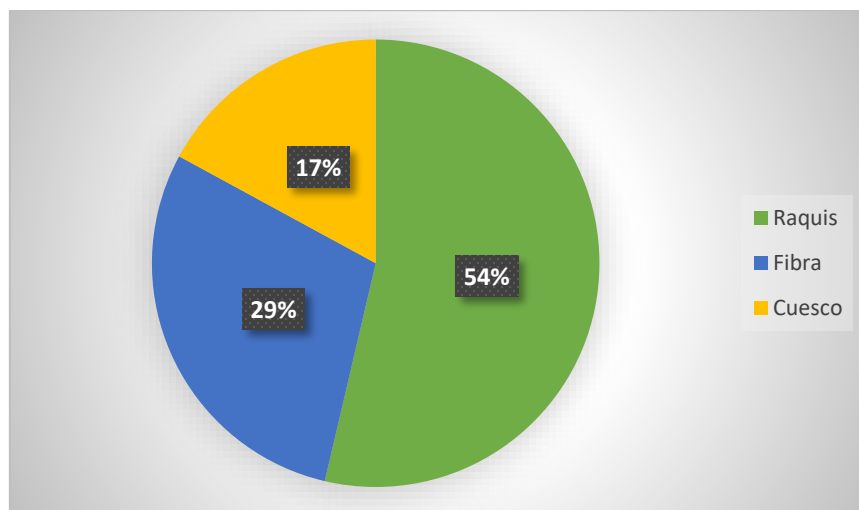
La extracción de aceite del fruto de la palma aceitera genera desechos que interactúan con el entorno natural y su manipulación está directamente relacionada con problemas

de contaminación y degradación del ambiente (Reinosa Pulido, 2009).

### 2.2.1 DESECHOS SÓLIDOS

Los desechos sólidos generados en la extracción de aceite rojo incluyen: raquis resultante del proceso de desfrutado, fibra proveniente del prensado del fruto, cuesco obtenido al romper la nuez, cáscara resultante de la separación de la nuez y la almendra y lodos de las lagunas de tratamiento biológico de los desechos líquidos (Ramírez Contreras, Silva Ramírez, Garzón González, & Yáñez Angarita, 2011). La cantidad de desechos producida es considerable, así, 1 ton de RFF produce aproximadamente 0,22 ton de raquis, 0,12 ton de fibra y 0,07 ton de cuesco, dando un total de 0,41 ton de desechos sólidos, sin tomar en cuenta la generación de lodos del sistema de tratamiento de los desechos líquidos (NEGCORPBIS S.A., 2012). La Figura 2.2 muestra la composición porcentual de los desechos sólidos, observándose que el 54% corresponde a raquis.

**FIGURA 2.2: COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA**



La fibra tiene una humedad entre el 12 y 45% y el cuesco tiene una humedad entre 7 y 15%, ambos son utilizados como combustible en las calderas para la generación de vapor (FEDEPALMA, 2011). Los lodos de las piscinas de tratamiento se caracterizan

por un alto contenido de nutrientes y humedad, sedimentan en el fondo y con el tiempo reducen eficiencia del tratamiento, por lo que es necesario su drenaje periódico. En la Tabla 2.1 se puede observar que por su composición química, rica en nitrógeno, fósforo y minerales, este lodo podría ser aplicado en el cultivo como acondicionador del suelo o utilizado para compostaje.

**TABLA 2.1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LODO EN BASE SECA**

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN
pH	-	8,4
Capacidad de intercambio catiónico	cmol/kg	11
Conductividad eléctrica	dS/m	11
Carbono orgánico	%	8,5
Nitrógeno	%	5,9
Potasio	g/kg	12,4
Calcio	g/kg	16,6
Magnesio	g/kg	7,8
Sodio	g/kg	0,2
Fósforo	mg/kg	500
Boro	mg/kg	5,1
Azufre	mg/kg	388
Cobre	mg/kg	0,9
Hierro	mg/kg	2,9
Manganeso	mg/kg	4,1
Zinc	mg/kg	0,5

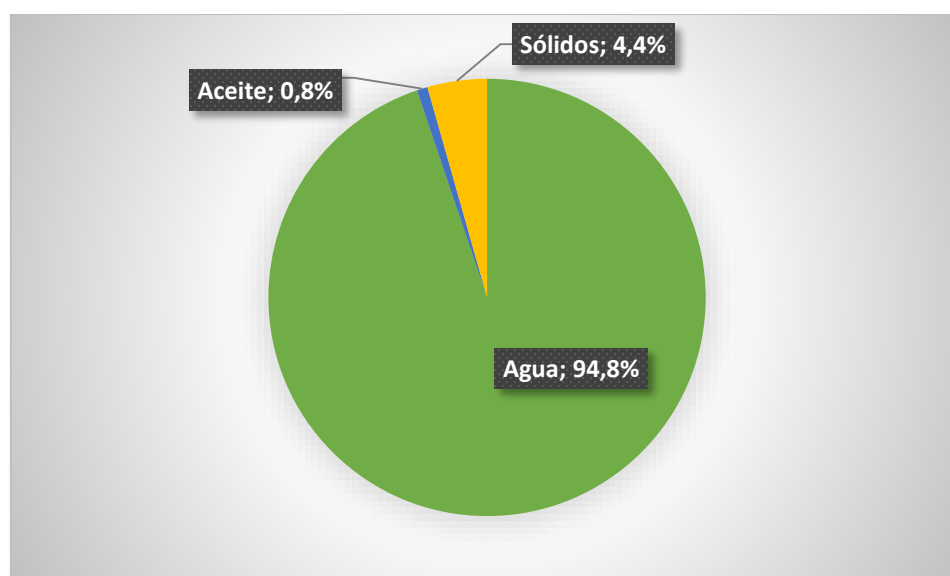
Fuente: (Ramírez Contreras, Silva Ramírez, Garzón González, & Yáñez Angarita, 2011)

### 2.2.2 DESECHOS LÍQUIDOS

El proceso de extracción de aceite rojo demanda gran cantidad de agua, en

consecuencia el efluente líquido de desecho es significativo, así, 1 ton de fruto procesado produce aproximadamente 0,648 ton de agua residual. El caudal diario de este efluente llega a ser 0,428 m<sup>3</sup>/ton.día y contiene 94,8% de agua, 0,8% de aceite y 4,4% de sólidos (NEGCORPBIS S.A., 2012), como se representa en la Figura 2.3.

**FIGURA 2.3: COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL EFLUENTE RESIDUAL DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA DE LA PLANTA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO**



**TABLA 2.2: ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA DE LA PLANTA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO**

ORIGEN	PORCENTAJE (%)
Clarificación	75
Esterilización	13
Deshidratación	8
Purgas de calderas	4

Fuente: (NEGCORPBIS S.A., 2012)

La Tabla 2.2 muestra las operaciones unitarias en las que se produce agua residual, se puede observar que la mayor generación se da en el proceso de clarificación con el 75%, seguido por el proceso de esterilización con el 13%.

La Tabla 2.3 muestra que el contenido de DBO, DQO, sólidos suspendidos y totales, nitrógeno y fósforo, en las aguas residuales de la extractora Palmar del Río es significativo, además los valores registrados sobrepasan los límites establecidos en la normativa vigente.

**TABLA 2.3: CARACTERIZACIÓN FÍSICA QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA PLANTA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO**

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN
* pH	-	4.55
*Temperatura	°C	67,4
Potasio	mg/L	1620
Nitrógeno	mg/L	900
Magnesio	mg/L	300
Fósforo	mg/L	120
Calcio	mg/L	320
Hierro	mg/L	120
Aceites y grasas	mg/L	8000
Sólidos suspendidos	mg/L	19500
Sólidos totales	mg/L	44000
DBO	mg/L	25000
DQO	mg/L	54000

\*Datos de CENIPALMA (CENIPALMA, 1996)

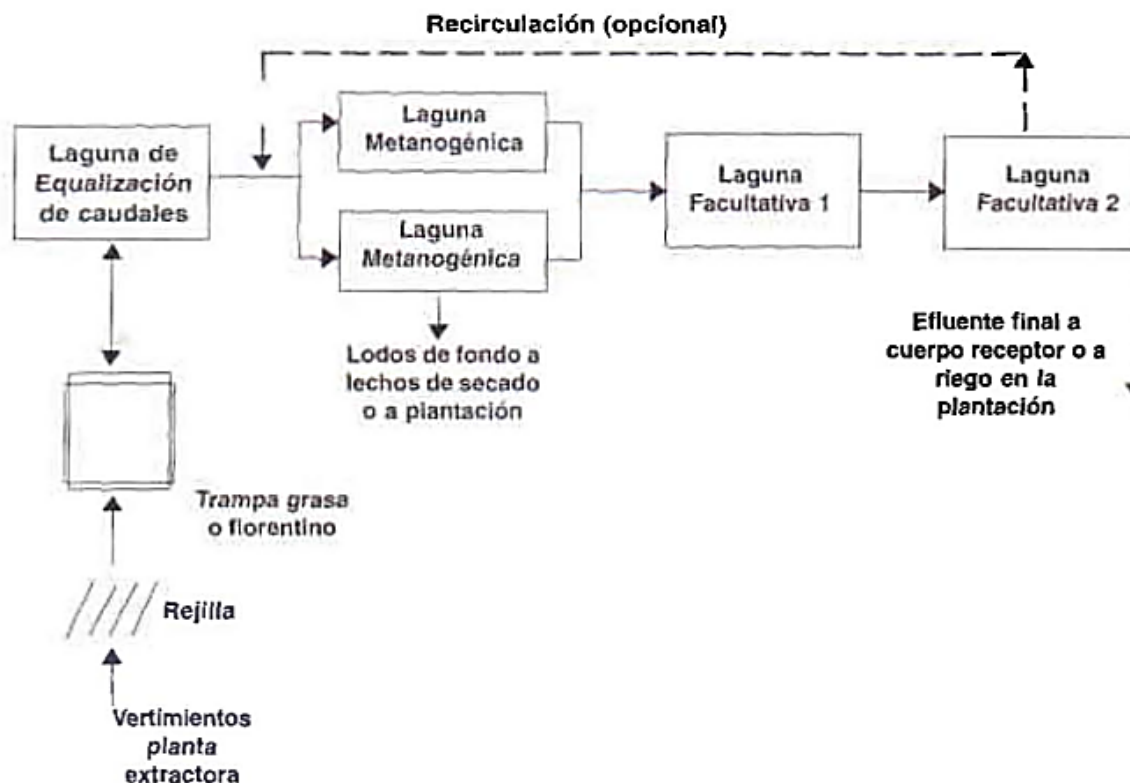
Fuente: ( (NEGCORPBIS S.A., 2012)

La descarga del efluente sin tratar podría causar un impacto negativo en el ambiente y en la salud de las poblaciones aledañas. En términos de población equivalente una extractora, con capacidad de 15 ton/d de RFF puede producir la contaminación de una población de aproximadamente de 180000 habitantes (CENIPALMA, 1996). Para la estabilización de estos efluentes se usan sistemas de tratamiento biológico. La Figura 2.4 muestra un esquema de un sistema de tratamiento de efluentes de plantas extractoras de aceite de palma, el cual está conformado por una serie de lagunas



aerobias, anaerobias y facultativas.

**FIGURA 2.4: FLUJOGRAMA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA.**



Fuente: (CENIPALMA, 1996)

### 2.2.3 EMISIONES GASEOSAS

Están relacionadas a la quema de combustible para la generación de vapor y el biogás que se libera en la digestión anaeróbica de las piscinas de tratamiento (Muñoz Perreño, 2016). Entre las emisiones se encuentran gases como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , HC, CO, además de material particulado. En la Tabla 2.4 se observa la generación de emisiones gaseosas para la producción de 1 t de aceite de palma.

**TABLA 2.4: EMISIONES GASEOSAS EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA**

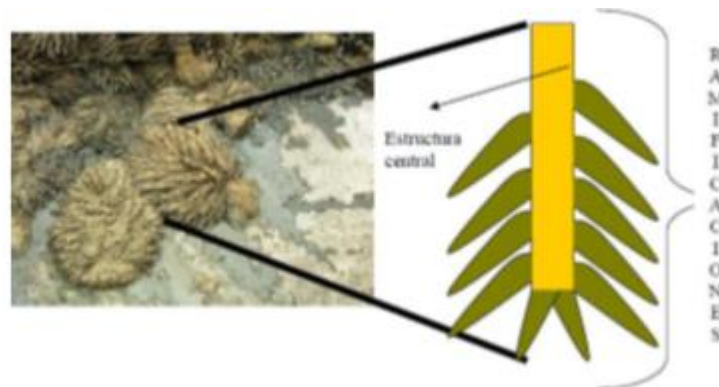
<b>EMISIÓN GASEOSA</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Material particulado	kg/t	1,04
SO <sub>2</sub>	kg/t	19,9
NO <sub>x</sub>	kg/t	13,2
HC	kg/t	0,13
CO	kg/t	0,66

Fuente: (MAE, 2013)

Adicionalmente, se generan cenizas como resultado de la combustión de la fibra y el cuesco en las calderas; por 1 ton de RFF procesada se obtiene entre 4 y 6 kg de cenizas cuya estructura es granular y porosa, contiene del 1,02 a 4,31% de potasio, 0,39 a 3,24% de calcio, 0,29 a 2,60% de magnesio, 0,28 a 1,33% de fósforo y trazas de nitrógeno. Asimismo, las cenizas poseen un efecto encalante y son utilizadas para mejorar suelos ácidos (Ramírez Contreras, Silva Ramírez, Garzón González, & Yáñez Angarita, 2011).

### **2.3 DESCRIPCIÓN DEL RAQUIS**

Este residuo constituye el esqueleto donde se ubica los frutos de la palma. Después del proceso de desfrute, queda una estructura de gran dureza formada por un tronco central y varias ramificaciones a manera de espigas, como se puede observar en la Figura 2.5. Está constituido básicamente por tres materiales poliméricos que son: celulosa, hemicelulosa y lignina. Posee una relación de C/N alta (> 25:1), una humedad del 60 al 65% y 1 a 2.5% de aceite vegetal impregnado. Adicionalmente, contiene un 0,5% de nitrógeno, 0,004% de fósforo, 5,68% de potasio, 0.8% de magnesio y 50% de materia orgánica (Ramírez Contreras, Silva Ramírez, Garzón González, & Yáñez Angarita, 2011). Tradicionalmente, el raquis ha sido utilizado como fertilizante, además ayuda a corregir la estructura del suelo y aporta con microorganismos que mejoran las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo (Páliz Hidalgo, 2014).

**FIGURA 2.5: ESTRUCTURA DEL RAQUIS**

Fuente: (Páliz Hidalgo, 2014)

## 2.4 BIOFILTRACIÓN

La biofiltración es una alternativa para la depuración de aguas residuales mediante procesos biológicos. Esta tecnología inició a nivel experimental en Alemania en la década de 1960 y en los últimos años se comenzaron a utilizar en el tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones (COSUDE, 2006), donde se utilizan biofiltros de poca profundidad rellenos con un material que sirve como lecho filtrante, en cuya superficie se desarrollan agregados de microorganismos, responsables de la biodegradación de los contaminantes (Sagrario Castillo, 2015).

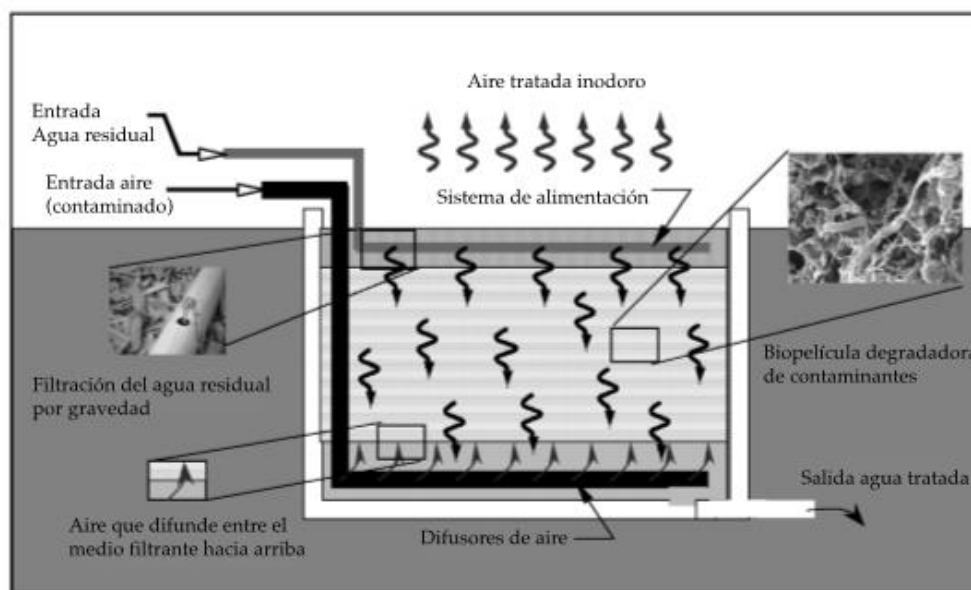
La biofiltración puede darse por flujo horizontal o vertical, se caracteriza por una eficiente eliminación de algunos contaminantes, esto se debe a la acción de factores como: bajas tasas de infiltración, procesos físicos, bioquímicos y actividad microbiológica. A fin de disminuir costos en las plantas depuradoras, se ha investigado la introducción de materiales orgánicos como lechos filtrantes (Eugenio Guzmán, 2017). Así mismo, se considera como una tecnología sostenible que alcanza altos niveles de remoción de contaminantes, ofreciendo ventajas como facilidad de construcción y bajos costos de operación y mantenimiento (Pacheco Toro, 2015).

### 2.4.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN BIOFILTRO

Los biofiltros utilizan la capacidad que poseen los organismos (micro, meso y macro), para degradar contaminantes orgánicos en compuestos de baja peligrosidad, de tal manera que puedan formar parte de los ciclos biogeoquímicos naturales (Posada Uribe & Mosquera López, 2007).

El biofiltro es alimentado con aguas residuales que percolan por el medio filtrante en donde son degradadas por la acción conjunta de cuatro mecanismos: 1) filtración lenta y pasiva, 2) absorción, adsorción e intercambio iónico, 3) biodegradación y 4) desinfección. La acción de microorganismos permite la degradación de sustancias contaminantes en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . La Figura 2.6 muestra los componentes de un biofiltro.

**FIGURA 2. 6: COMPONENTES DE UN BIOFILTRO**



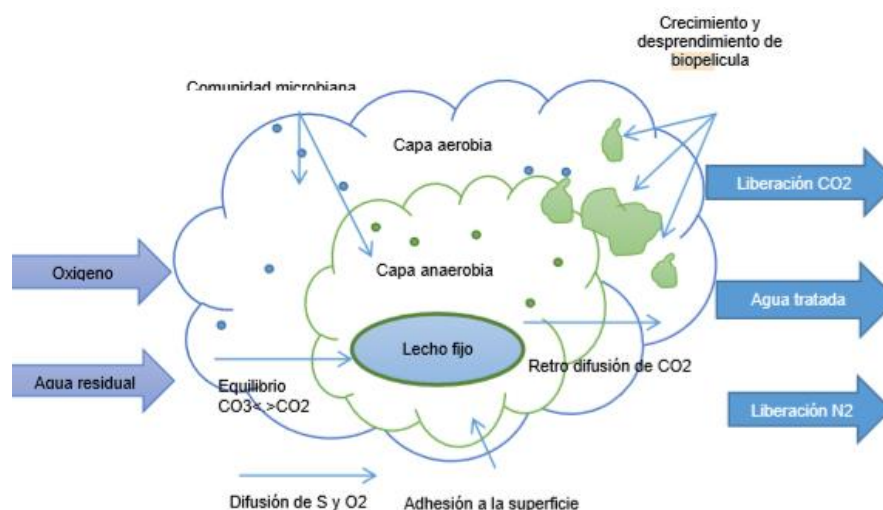
Fuente: (Garzón Zúñiga, Buelna, & Moeller Chávez, 2012)

Un factor importante es la formación de la biopelícula, la cual puede definirse como un conjunto de agregados de microorganismo que se mantienen adheridos a una

superficie, este tipo de asociación ofrece a los microorganismos ciertas ventajas en su crecimiento y desarrollo (Sagrario Castillo, 2015).

La comunidad microbiana que conforma la biopelícula puede estar formada por bacterias facultativas, aerobias, anaerobias, protozoos, algas y hongos; también pueden encontrarse bacterias nitrificantes en aguas con cargas contaminantes bajas (Pacheco Toro, 2015), tal como se puede observar en la Figura 2.7. Por otro lado, cuando la carga contaminante es elevada pueden encontrarse bacterias heterótrofas, estos microorganismos se encargan de sintetizar y excretar enzimas que les permite adherirse a una superficie, brindándole a la biopelícula estabilidad (Posada Uribe & Mosquera López, 2007).

**FIGURA 2.7: ESTRUCTURA DE LA BIOPELÍCULA**



Fuente: (Pacheco Toro, 2015)

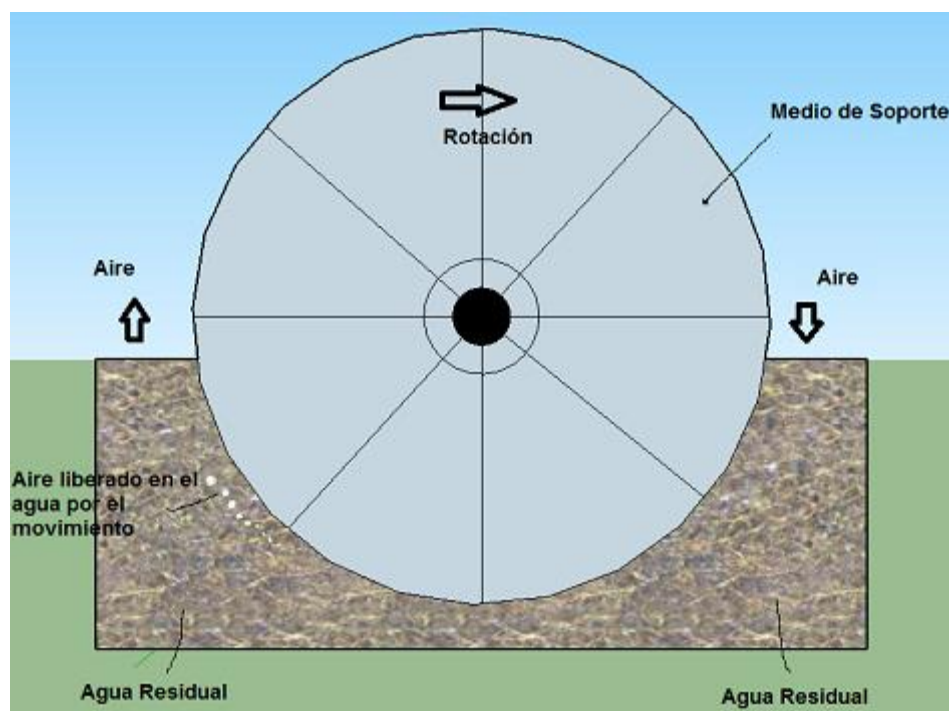
## 2.4.2 TIPOS DE BIOFILTROS

### 3.2.2.1 Biodisco rotatorio

Está formado por discos de diferentes materiales (madera, polietileno corrugado, poliestireno corrugado, PVC) y su funcionamiento se basa en la rotación de un disco

semisumergido en el agua a tratar, facilitando la transferencia de oxígeno. La biopelícula se forma sobre los discos y las bacterias utilizan la materia orgánica del agua residual como alimento (Deloya Martínez, s.f.). La Figura 2.8 muestra el esquema de un biodisco rotatorio:

**FIGURA 2.8: ESQUEMA DE UN BIODISCO ROTATORIO**

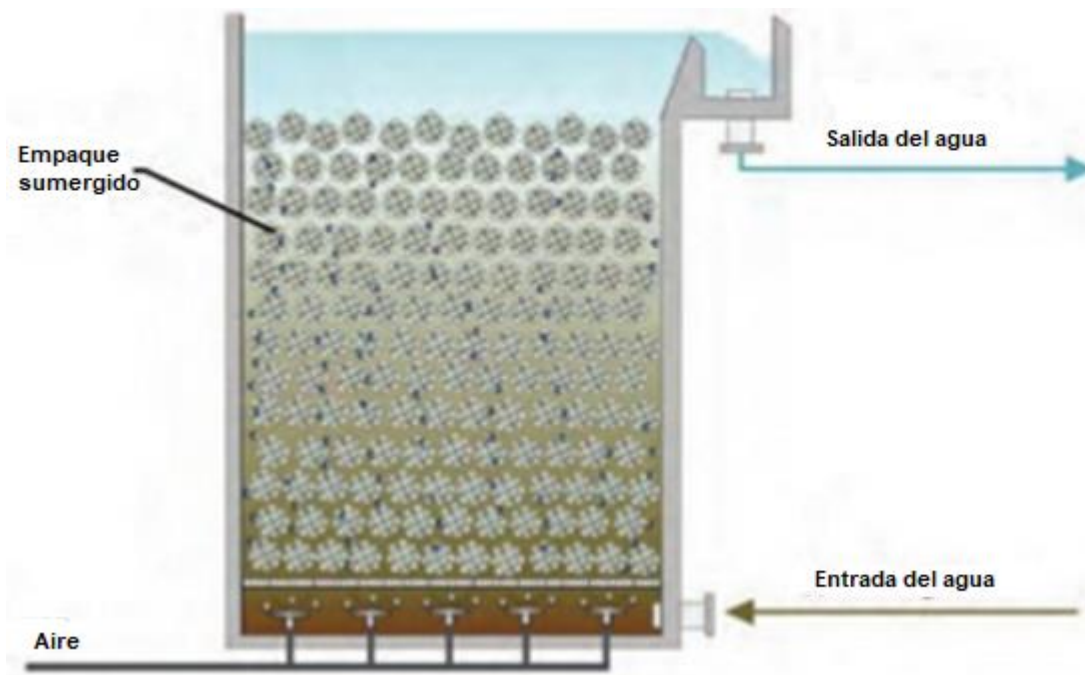


Fuente: (González Valenzuela, 2016)

### 3.2.2.2 Biofiltros sumergidos

Están formados por un lecho de soporte sobre el cual se desarrollan bacterias y a través del cual fluye el agua residual en flujo ascendente o descendente. Los sólidos se pueden acumular dentro del filtro sumergido, este proceso eventualmente saturará los poros, requiriendo un mecanismo de limpieza de sólidos. Los medios utilizados son de gran tamaño, por ejemplo, roca triturada de aproximadamente 5 cm de diámetro o plásticos con 2,5 cm de diámetro; para proveer poros de mayor tamaño y prevenir el atascamiento (Galli Merino & Sal, 2007). La Figura 2.9 muestra el esquema de un biofiltro sumergido.

**FIGURA 2.9: ESQUEMA DE UN BIOFILTRO SUMERGIDO**



Fuente: (Noyola, Muergan & Güereca, 2013)

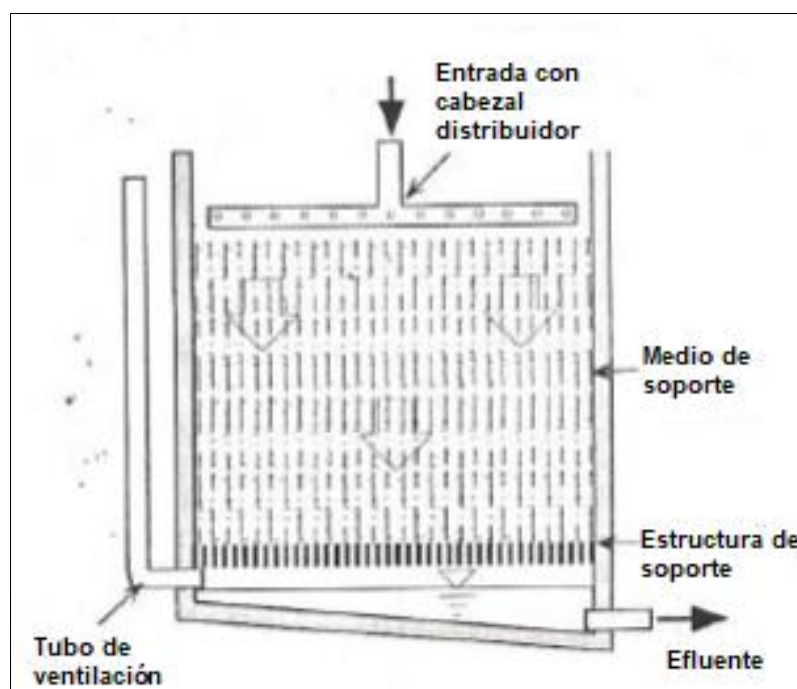
El soporte está inundado y las condiciones aerobias se mantienen a través de un sistema de aireación. Una de las limitaciones que presenta es el crecimiento de la biomasa, pues en un momento dado puede saturar el medio y provocar condiciones anaerobias. Para remover el exceso de biomasa se utilizan contralavados, lo que implica un periodo para la formación de una nueva biopelícula (Sagrario Castillo, 2015).

### 3.2.2.3 Biofiltros percoladores

Este biofiltro comprende un relleno o lecho filtrante a través del cual el agua residual percola y es distribuida de forma uniforme sobre el lecho, los microorganismos se fijan al lecho mediante interacciones iónicas entre el material de contacto y la comunidad microbiana (Pacheco Toro, 2015). La materia orgánica y coloidal es degradada por la actividad microbiana de la biopelícula y otros procesos como oxidación aerobia, biosorción, intercambio iónico, coagulación, descomposición anaerobia y precipitaciones en el biofiltro (Ramalho, 2003).

El agua residual fluye descendientemente manteniendo la película bacteriana mojada, pero no completamente sumergida. Son el tipo de biofiltro más utilizado por su baja complejidad de construcción y operación, son auto aireantes y muy efectivos para desgasificar  $\text{CO}_2$  (Galli Merino & Sal, 2007). La Figura 2.10 muestra el esquema de un biofiltro percolador.

**FIGURA 2.10: ESQUEMA DE UN BIOFILTRO PERCOLADOR**



Fuente: (Timmons, 2002)

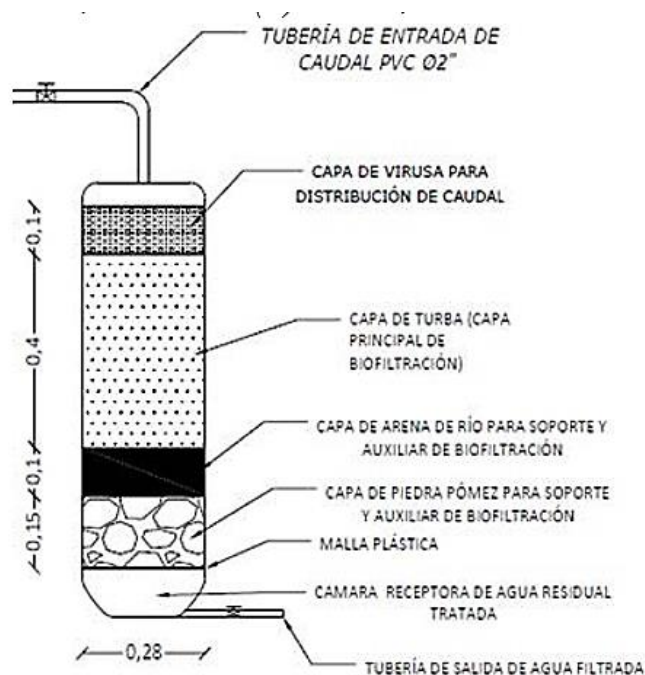
La eficiencia de estos biofiltros puede verse afectada por la naturaleza de los lechos y la granulometría. Una mayor superficie y porosidad del filtro optimizan el proceso de adsorción que ayuda a la eliminación de compuestos orgánicos. Entre los materiales filtrantes comunmente utilizados se encuentran: piedra caliza, piedra pómez, plásticos y materiales carbónicos como antracita (COSUDE, 2006). El biofiltro percolador remueve entre el 40% y 70 % de la materia orgánica gracias a la adsorción y el crecimiento celular microbiano, creando biopelículas de aproximadamente 2 mm de espesor (Pacheco Toro, 2015).



### 3.2.2.4 Biofiltros sobre materiales orgánicos.

Este tipo de biofiltros es una tecnología pasiva que necesita poca intervención técnica. En estudios previos se han utilizado como materiales de soporte turba, astillas de madera y corteza de coníferas, obteniendo eficiencias en DQO  $\geq 90\%$ , en DBO<sub>5</sub>  $\geq 99\%$ , en SST  $\geq 95\%$  y en aceites y grasas de  $\geq 98\%$  (Garzón Zúñiga, Buelna, & Moeller Chávez, 2012).

**FIGURA 2.11: ESQUEMA DE BIOFILTRO SOBRE CAMA DE TURBA**



Fuente: (Morales Fiallos, Medina Robalino, & Paredes Beltrán , 2017)

La turba es un material orgánico parcialmente fosilizado o en descomposición, presente en zonas pantanosas altas o con alto contenido de humedad; presenta características adsorbentes en la filtración de aguas residuales. Así mismo, es eficiente en el tratamiento de sólidos totales y disueltos, olores, materia orgánica, aceites y nutrientes (Morales Fiallos, Medina Robalino, & Paredes Beltrán , 2017). La Figura 2.11 muestra el esquema de un biofiltro sobre cama de turba.

## 2.5 MARCO LEGAL APLICABLE

El Ministerio del Ambiente en el Anexo I del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua, establece una serie de criterios generales, principios básicos y normas generales, para descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce. Establece que las aguas residuales de origen público o privado deben ser tratadas, de modo que cumplan con los parámetros de descarga establecidos en esta Norma (inciso 5.2.4.10).

**TABLA 2.5: LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE**

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	30
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/L	100
Potencial de hidrógeno	pH	-	6-9
Sólidos sedimentables	-	mL/L	1
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	130
Sólidos totales	ST	mg/L	1 600

FUENTE: (Anexo I del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Recurso Agua, 2017).

Adicionalmente, en el inciso 5.2.4.11, se prohíbe la descarga de agua residual sin tratar hacia los cuerpos receptores, ya que pueden causar alteraciones ambientales negativas (MAE, 2017). Además, la Autoridad Ambiental Nacional establece en las Tablas 12 (inciso 5.2.1.2) y 10 (inciso 5.2.4.6), la guía técnica de los parámetros de descarga que debe cumplir todo efluente. Basada en las tablas antes mencionadas, se presenta en la Tabla 2.5 los parámetros a considerarse en la presente investigación.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

##### 3.1.1 ORIGEN DEL AGUA RESIDUAL

Las muestras del agua residual fueron tomadas en las instalaciones de la empresa Palmar del Río, dedicada a la extracción de aceite de palma, está ubicada en la parroquia San José de Guayusa, cantón Francisco de Orellana, provincia Orellana. El punto de muestreo se encuentra a la salida de la Piscina N1, que actúa como trampa de grasas y lodos, como se puede observar en la Figura 3.1.

**FIGURA 3.1: UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO.**



### 3.1.2 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN

Para los fines de la presente investigación los parámetros físicos evaluados fueron: sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y sólidos totales; los parámetros químicos fueron: DQO, aceites y grasas, pH y DBO<sub>5</sub> como parámetro biológico. La Tabla 3.1 muestra los métodos utilizados para la cuantificación de los parámetros a ser analizados.

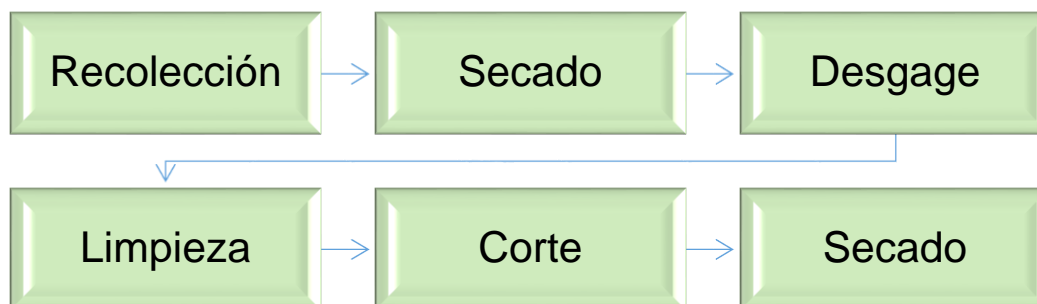
**TABLA 3.1: MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS**

PARÁMETRO	UNIDAD	TIPO	MÉTODO
pH	-	Químico	Medidor multiparámetros OAKTON
Aceites y grasas	mg/L	Químico	Gravimétrico
Sólidos sedimentables	mL/L	Físico	Gravimétrico
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Físico	Gravimétrico
Sólidos disueltos totales	mg/L	Físico	Gravimétrico
Sólidos totales	mg/L	Físico	Gravimétrico
DQO	mg/L	Químico	Reflujo cerrado, método colorimétrico
DBO <sub>5</sub>	mg/L	Biológico	Incubación, consumo de oxígeno

## 3.2 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RAQUIS COMO LECHO FILTRANTE



### 3.2.1 ACONDICIONAMIENTO DEL RAQUIS

El acondicionamiento del raquis para ser usado como lecho filtrante siguió las etapas mostradas en la Figura 3.2.

**FIGURA 3.2: ETAPAS DEL ACONDICIONAMIENTO DEL RAQUIS**

La recolección del raquis se realizó en las instalaciones de la empresa Palmar del Río, se muestrearon aproximadamente 200 kg del material y se transportó hasta el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, en la ciudad de Quito. El raquis se sometió a un proceso de secado al sol por un periodo de 72 horas a temperatura ambiente (aproximadamente de 16 °C).

**TABLA 3.2: GRANULOMETRÍA DEL RAQUIS ACONDICIONADO**

GRANULOMETRÍA	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	IMAGEN
1	5	0.01	
2	10	2	

Posteriormente, se procedió al desgaje del raquis, es decir, a separar las espigas del tronco central, adicionalmente, con la ayuda de tijeras de jardinería se retiró las impurezas contenidas en las espigas o gajos, como restos de frutos y cortezas. Seguidamente, se procedió al cortado obteniendo dos granulometrías y se sometió nuevamente a un proceso de secado al sol por un periodo de 48 horas. Al final del

proceso se obtuvo un raquis acondicionado con las especificaciones mostradas en la Tabla 3.2.

### 3.2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL RAQUIS ACONDICIONADO

#### 3.2.2.1 Humedad

La humedad del raquis acondicionado se realizó mediante el método gravimétrico, este método mide el porcentaje de humedad por diferencia de peso inicial y final de las muestras. El procedimiento seguido incluyó los siguientes pasos:

1. Pesar en una balanza analítica, marca ae ADAM ( $\pm 0,0001$  g), 2 gramos de raquis acondicionado.
2. Colocar la muestra en un crisol de porcelana previamente tarado.
3. Colocar el crisol en una estufa, marca BINDER ( $100 \pm 3^\circ\text{C}$ ), por un periodo al menos de 3 h.
4. Retirar el crisol de la estufa y dejar en un desecador por una hora.
5. Registrar el nuevo peso (peso final).
6. Calcular el porcentaje de humedad mediante la ecuación 3.1.
7. Repetir los pasos del 1 al 6 por triplicado para cada granulometría.

$$\%H = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

% H: humedad, %

P<sub>i</sub>: peso inicial, g

P<sub>f</sub>: peso final, g

La Tabla 3.3 muestra los datos registrados en laboratorio y los resultados obtenidos:

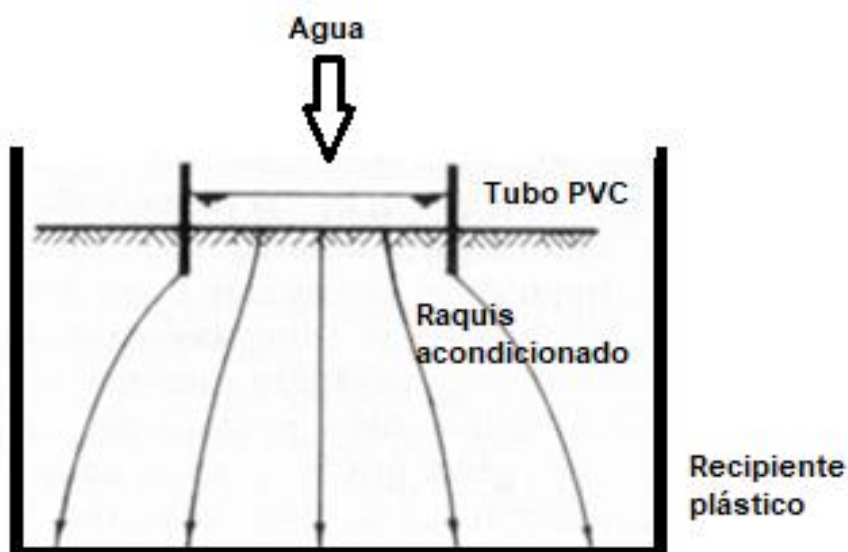
**TABLA 3.3: HUMEDAD DE RAQUIS CONDICIONADO**

GRANULOMETRÍA	ENSAYO	P <sub>i</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	%H	%H PROMEDIO
1	1	1,9807	1,3321	32,7460	39,34
	2	2,0609	1,1934	42,0933	
	3	2,1005	1,1932	43,1945	
2	1	2,1201	1,2004	43,3800	41,58
	2	2,1571	1,2157	43,6419	
	3	1,9856	1,2366	37,7216	

### 3.2.2.2 Tasa de infiltración

La tasa de infiltración del material acondicionado se realizó mediante el método del infiltrómetro de anillo simple, la Figura 3.3 muestra un esquema de la prueba de infiltración de anillo simple

**FIGURA 3.3: PRUEBA DE INFILTRACIÓN DE ANILLO SIMPLE**



(Blanco Sepúlveda, 1999)

Los materiales utilizados fueron los enlistados a continuación:

- Tubo PVC de 16 cm de diámetro



- b) Probeta de 500 mL
- c) Un recipiente plástico de base rectangular
- d) Una regla graduada
- e) Un cronómetro
- f) Una funda plástica
- g) Raquis acondicionado.

El procedimiento seguido incluyó los siguientes pasos:

1. Colocar el raquis acondicionado en el recipiente plástico.
2. Enterrar el tubo PVC hasta una profundidad de 1cm.
3. Verter en el extremo superior del tubo PVC un volumen de 500 mL de agua.
4. Registrar el tiempo en que el agua se infiltró en el raquis acondicionado.
5. Calcular la tasa de infiltración mediante la ecuación 3.2.
6. Repetir los pasos del 1 al 5 por triplicado para cada granulometría.

$$TI = \frac{V}{Axt} \quad (3.2)$$

Donde:

TI: tasa de infiltración, mL/min.cm<sup>2</sup>

A: área de base del tubo PVC, cm<sup>2</sup>

t: tiempo que demora el fluido en infiltrarse, min

V: volumen de fluido infiltrado, mL

La Figura 3.4 muestra la realización del ensayo para determinar la tasa de infiltración del raquis acondicionado.

**FIGURA 3.4: ENSAYO DE TASA DE INFILTRACIÓN**

La Tabla 3.4 muestra los datos registrados en laboratorio y los resultados obtenidos.

**TABLA 3.4: TASA DE INFILTRACIÓN DEL RAQUIS ACONDICIONADO**

GRANULOMETRÍA	ENSAYO	V (mL)	A (cm <sup>2</sup> )	t (min)	TI (mL/min.cm <sup>2</sup> )	TI PROMEDIO (mL/min.cm <sup>2</sup> )
1	1	500	201.06	1,50	1,66	1,65
	2	500	201.06	1,55	1,60	
	3	500	201.06	1,47	1,69	
2	1	500	201.06	1,25	1,99	1,95
	2	500	201.06	1,30	1,91	
	3	500	201.06	1,28	1,94	

### 3.2.2.3 Porosidad

Para determinar la porosidad se utilizó un método gravimétrico, el procedimiento seguido consistió de los siguientes pasos:

1. Llenar una probeta de 250 mL con el raquis acondicionado, pesar y registrar como  $P_1$ .
2. Llenar una probeta de 500 mL con agua y se verter su contenido en la probeta que contiene el raquis acondicionado hasta que la muestra se sature.
3. Pesar la probeta con el raquis saturado y registrar como  $P_2$ .

4. Calcular el porcentaje de porosidad con la ecuación 3.3.
5. Repetir los pasos del 1 al 4 por triplicado para cada granulometría.

$$\%P = \frac{P_2 - P_1}{P_2} \times 100 \quad (3.3)$$

Donde:

%P: porosidad, %

P<sub>2</sub>: peso del raquis acondicionado saturado, g

P<sub>1</sub>: peso del raquis acondicionado, g

La Figura 3.5 muestra la realización del ensayo para determinar la porosidad del raquis acondicionado.

**FIGURA 3.5: ENSAYO DE POROSIDAD**



La Tabla 3.5 muestra los datos registrados en laboratorio y los resultados obtenidos.

**TABLA 3.5: ENSAYOS PARA DETERMINAR POROSIDAD**

GRANULOMETRÍA	ENSAYO	P1 (g)	P2 (g)	%P	%P PROMEDIO
1	1	271	676	59,91	59,99
	2	268	674	60,24	
	3	272	677	59,82	
2	1	338	685	50,66	50,66
	2	339	683	50,37	
	3	337	687	50,95	

### **3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO**

El sistema experimental fue ubicado en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, en la ciudad de Quito.

Se construyeron seis biofiltros, combinando dos variables: 1) granulometría y 2) espesor del lecho. Los biofiltros fueron sujetos en un soporte de madera de 1,60 por 1,50 m. Adicionalmente, se diseñó un sistema de bombeo y alimentación del agua residual a los biofiltros.

#### **3.3.1 MATERIALES**

Los materiales de soporte del lecho fueron grava de ½" y arena lavada de río, los cuales fueron colocados en la parte inferior del biofiltro y como material de distribución de caudal se utilizó viruta. El material de construcción de los biofiltros fue plástico de botellas recicladas de polietileno tereftalato (PET) de 1,35 L, con un diámetro de 8,15 cm. Adicionalmente, para asegurar que no se pierda el material de soporte se taparon las bases de los biofiltros con las tapas de las botellas PET con pequeños orificios.

#### **3.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS**

##### **3.3.2.1 Altura, área y volumen**

El sistema de biofiltros consideró dos variables: 1) granulometría y 2) espesor del lecho; en función de las cuales se estableció tres espesores del lecho filtrante y dos granulometrías y a partir de éstas variables se calculó el área y volumen de los biofiltros.

El área del biofiltro se calculó con la ecuación 3.4:

$$A = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \quad (3.4)$$

Donde:

A: área, m<sup>2</sup>

∅: diámetro del envase PET, m

El volumen del biofiltro se calculó con la ecuación 3.5:

$$V = A.H \quad (3.5)$$

Donde:

V: volumen total, m<sup>3</sup>

A: área, m<sup>2</sup>

H: altura total, m

La Tabla 3.6 muestra una descripción detallada de las dimensiones y los componentes de los biofiltros.

**TABLA 3.6: DIMENSIONES Y COMPONENTES DE LOS BIOFILTROS**

BIOFILTRO	GRANULOMETRÍA DEL LECHO FILTRANTE	ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE (cm)	ESPESOR DEL MATERIAL DE SOPORTE (cm)	ESPESOR DEL MATERIAL DE DISTRIBUCIÓN (cm)	ESPESOR TOTAL (cm)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN TOTAL (m <sup>3</sup> )
1	1	40	15	5	60	0,0052	0,0031
2	1	50	15	5	70	0,0052	0,0037
3	1	60	15	5	80	0,0052	0,0042
4	2	40	15	5	60	0,0052	0,0031
5	2	50	15	5	70	0,0052	0,0037
6	2	60	15	5	80	0,0052	0,0042

### 3.3.2.2 Carga hidráulica

En adición a la geometría del reactor, se incluye el cálculo de parámetros de importancia como la carga hidráulica, considerando un caudal de alimentación de 1 mL/min. La carga hidráulica se calculó con la ecuación 3.6.

$$CH = \frac{Q}{A_B} \quad (3.6)$$

Donde:

CH: carga hidráulica,  $m^3/m^2 \cdot día$

Q = caudal,  $m^3/día$

$A_B$  = área de la base del biofiltro,  $m^2$

Reemplazando los valores de caudal y área se tuvo que:

$$CH = \frac{0,0014 \text{ m}^3}{\text{día}} * \frac{1}{0,0052 \text{ m}^2} = 0,28 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$$

### 3.3.2.3 Carga orgánica

La carga orgánica se calculó con la ecuación 3.7.

$$CO = DBO_5 * Q \quad (3.7)$$

Donde:

CO: carga orgánica,  $kg \text{ DBO}_5/día$

Q = caudal,  $L/día$

$DBO_5$  = demanda bioquímica de oxígeno,  $kg \text{ DBO}_5/ L$

$$CO = 0,028 \frac{\text{kg DQO}}{L} * \frac{1,44 \text{ L}}{\text{día}} = 0,041 \text{ kg DBO}_5/día$$

### 3.3.2 ENSAMBLAJE Y PUESTA EN MARCHA DE LOS BIOFILTROS

El sistema de biofiltros reposó sobre un soporte de madera, los efluentes resultantes fueron receptados por envases plásticos, ubicados bajo cada biofiltro. Los biofiltros fueron armados según las especificaciones que se muestran en la Tabla 3.6: Dimensiones y componentes de los biofiltros. El agua a tratar se alimentó mediante un sistema que permitió mantener un caudal constante de 1 mL/min; conformado por un tanque de alimentación de 80 L ubicado a 2 m de altura, el agua residual pasó a un

tanque de 12 L, ubicado a una altura de 1,50 m, cuya función fue mantener una carga hidráulica constante. Finalmente, el agua de rebose pasó a un tanque de 50 L ubicado a nivel del suelo.

El diseño incluye un sistema de bombeo que opera con una bomba de potencia 1HP, el cual se encarga de proveer de agua residual al tanque de alimentación. La Figura 3.6 muestra el sistema descrito anteriormente.

**FIGURA 3.6: SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN**



El efluente a tratar presentó una alta concentración de sólidos sedimentables, precipitando en el tanque de alimentación, requiriendo una homogenización diaria del tanque de alimentación, de modo que se optó por un bombeo diario desde el tanque de reboce hacia el tanque de alimentación, esta recirculación permitió tener un afluente homogéneo.

### **3.4 MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Se estableció un periodo de monitoreo de aproximadamente 10 semanas, con una frecuencia de muestreo de dos veces por semana. La Tabla 3.7 muestra el cronograma de muestreo del efluente de los biofiltros:

**TABLA 3.7: CRONOGRAMA DE MONITOREO**

SEMANA	TIEMPO (días)
1	0
	3
2	6
	9
3	13
	16
4	20
	23
5	27
	30
6	34
	37
7	41
	44
8	48
	51
9	55
	58
10	62
	65

Se realizó la caracterización física, química y biológica del efluente tratado con el fin de obtener datos que permitan determinar la eficiencia de los biofiltros. Los parámetros evaluados están enlistados y descritos en la Tabla 3.1: Parámetros físicos, químicos y biológicos.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL RAQUIS ACONDICIONADO

El raquis acondicionado con granulometría 2 es dos veces más largo y 200 veces más ancho que el raquis con granulometría 1, influyendo en la pérdida de humedad durante el proceso de secado, pues se observa en la Tabla 4.1 que el raquis con granulometría más fina presenta una menor humedad promedio. Se puede observar que una granulometría más fina le otorga al raquis acondicionado una mayor porosidad, lo cual influye en la tasa de infiltración promedio, ya que el agua va a inundar los poros disponibles y una vez saturados va a infiltrarse el excedente. De forma general se puede decir que la granulometría 1 (fina) presenta una menor humedad, mayor porosidad y menor tasa de infiltración que la granulometría 2 (gruesa).

**TABLA 4.1: CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL RAQUIS ACONDICIONADO**

Granulometrías	Largo (cm)	Ancho (cm)	%H promedio	TI promedio (mL/min.cm <sup>2</sup> )	%P promedio
1	5	0.01	39,34	1,65	59,89
2	10	2	41,58	1,95	50,66

#### 4.2 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL

El efluente residual del proceso industrial de la empresa Palmar del Río tiene un olor desagradable y una coloración café oscura. Es común que en su superficie se forme una nata de grasa o aceite, además, es densa, evidenciada por la cantidad de sólidos

sedimentables y tiene carácter ácido con un pH igual a 3. En la Tabla 4.2 se observa las características del agua residual de la empresa.

**TABLA 4.2: CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y BIOLÓGICA DEL AGUA RESIDUAL DE PALMAR DEL RÍO, 2017**

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN
pH	-	3,0
Aceites y grasas	mg/L	342,3
Sólidos sedimentables	mL/L	300
Sólidos suspendidos totales	mg/L	16 950
Sólidos disueltos totales	mg/L	24 800
Sólidos totales	mg/L	41 750
DBO	mg/L	28 800
DQO	mg/L	36 000

La Tabla 4.2 indica que el pH del afluente industrial a ser tratado es ácido, esto se debe a que el endocarpio del fruto de la palma posee ácidos grasos, los mismos que proveen de hidronios incidiendo directamente en la naturaleza ácida de las aguas residuales. Otros contaminantes que alcanzan elevadas concentraciones son SSed y SDT, esto se debe a que la clarificación, en el centrifugado de lodos, ciclonado y tamizado, pueden escapar cierta cantidad de lodo con partículas de diferentes granulometrías que se suman a la composición del efluente a tratar.

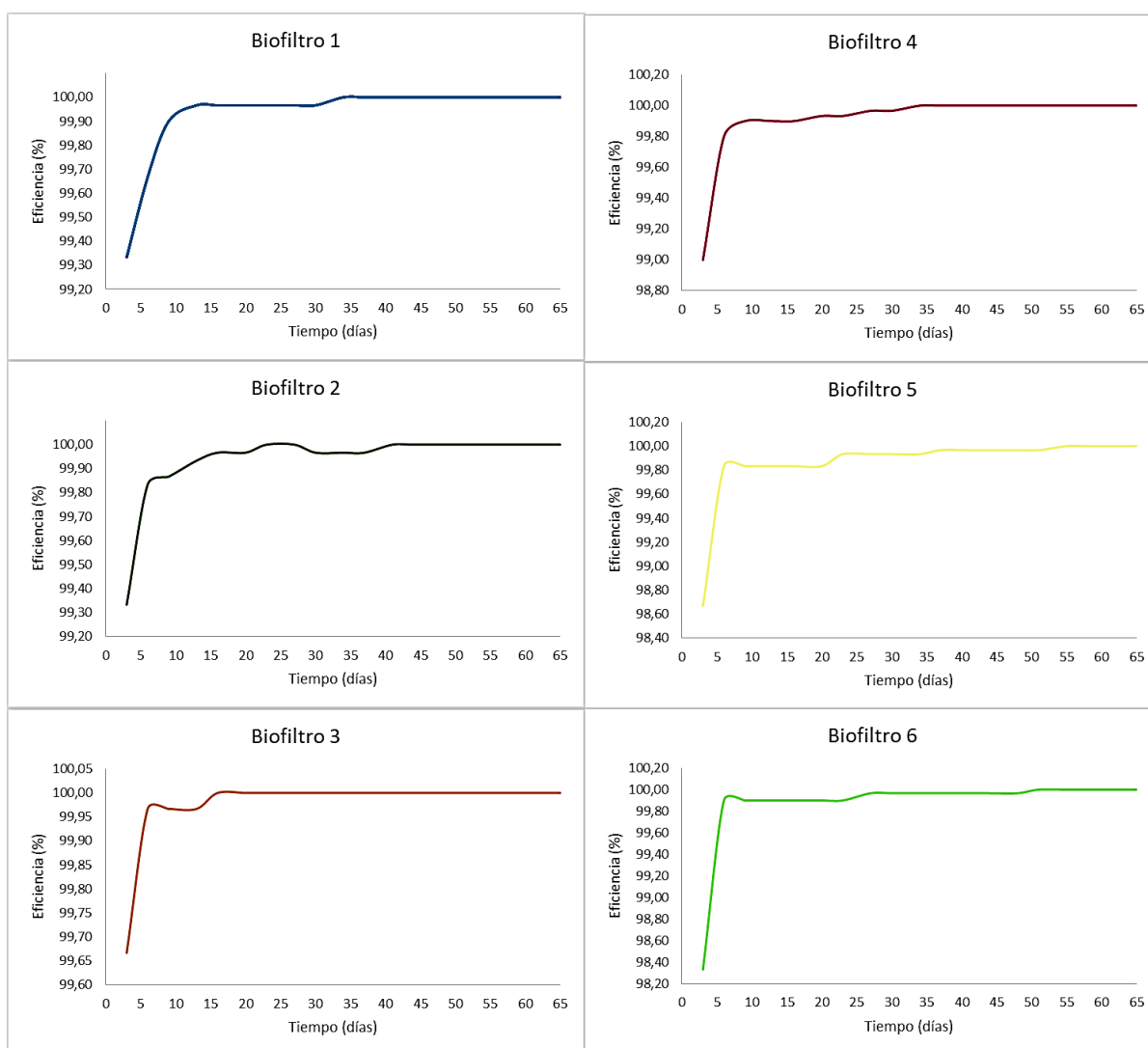
La alta cantidad de materia orgánica reflejada en el valor de DBO se debe a que durante el proceso de prensado se libera ácidos grasos y tejido fibroso propio del fruto de la palma, parte de estos son recuperados dentro del proceso de extracción, pero otra parte sale en el efluente residual. Adicionalmente, la relación entre DBO/DQO para este efluente es de 0,8, valor que indica que tiene una alta biodegradabilidad.

## 4.3 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LOS BIOFILTROS Y DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL EFLUENTE TRATADO

### 4.3.1 SÓLIDOS SEDIMENTABLES

Todos los biofiltros alcanzaron una eficiencia del 100% de remoción de SSed, se puede observar en la Figura 4.1, que al tercer día de tratamiento ya se alcanzan eficiencias entre el 98% y 99%, es decir, que de una concentración inicial de 300 mL/L se alcanzaron valores de 1 a 5 mL/L de SSed. Entre el tercer y el décimo día se observa

**FIGURA 4.1: EFICIENCIA DE LOS BIOFILTROS PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES**



que las eficiencias son superiores al 99%, con concentraciones de 0,1 a 0,5 mL/L de SSed. Conforme avanzó el tiempo, la eficiencia incrementó de manera paulatina. El primer biofiltro en alcanzar el 100% de eficiencia fue el número 3, después de un periodo de 16 días de operación, seguido por los números 1 y 4 (34 días) y el último fue el Biofiltro 5 a los 55 días.

La completa remoción de sólidos sedimentables se debe a que el raquis acondicionado posee una buena porosidad (59,99% para la granulometría 1 y 50,96% para la granulometría 2), lo que implica la disponibilidad de lugares físicos idóneos para la retención de dichos sólidos.

#### **4.3.2 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES**

El afluente a tratar a simple observación posee una alta turbidez, que está relacionada con la alta concentración de sólidos suspendidos. La problemática ligada a la presencia de dichos sólidos es que interfiere negativamente en la vida lítica, puesto que afecta al sistema de organismos y microorganismos acuáticos. Sinérgicamente, dificulta un tratamiento biológico debido a que la intensidad de radiación luminosa disminuye (Arana Ysa, 2010).

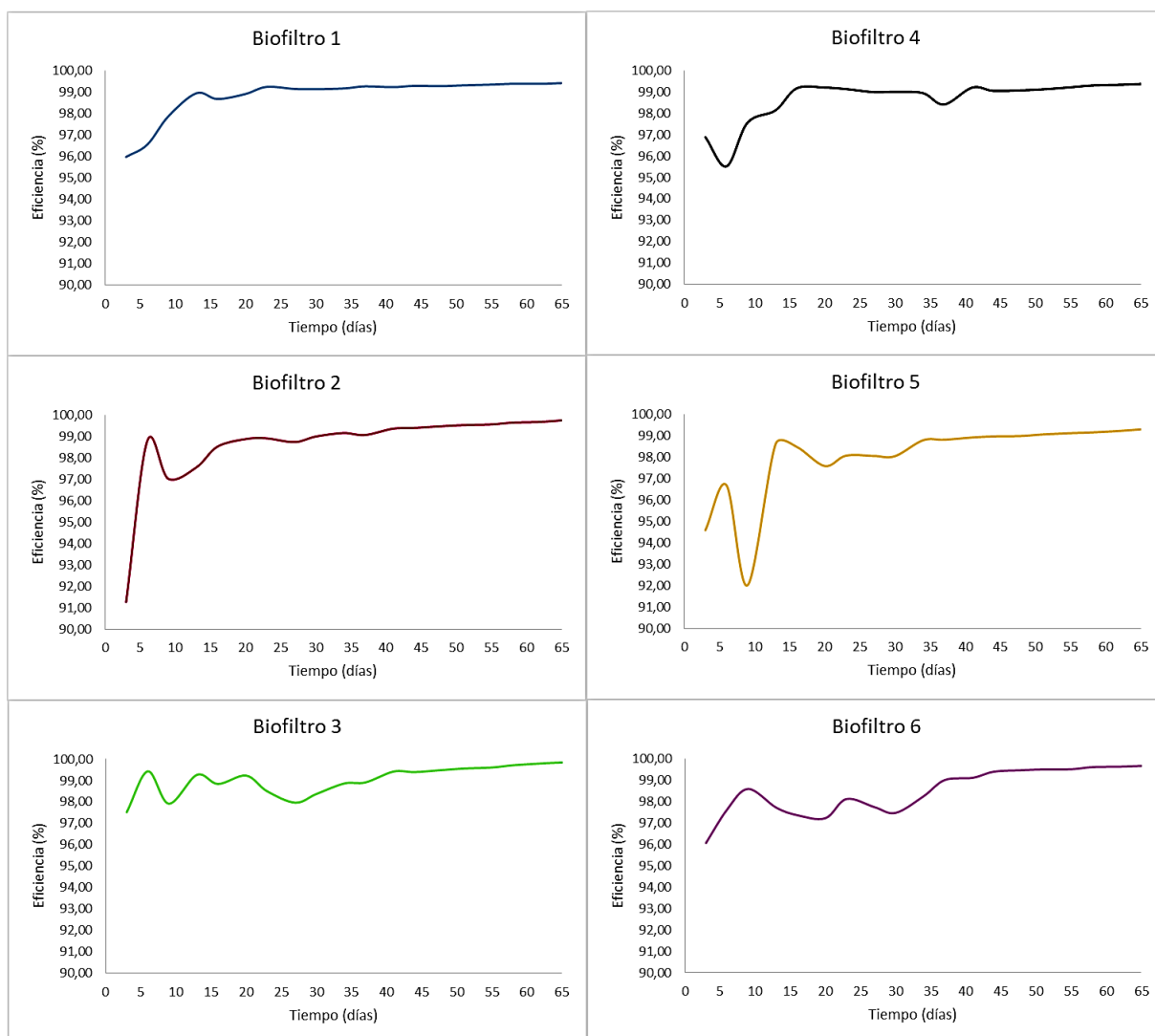
Todos los biofiltros alcanzaron una eficiencia superior al 99% de remoción de SST, se puede observar en la Figura 4.2, que al tercer día de tratamiento ya se alcanzan eficiencias entre el 91% y 97%, es decir, que de una concentración inicial de 16 950 mg/L se alcanzaron valores de 420 a 1 480 mg/L de SST.

También, se observa que durante los primeros 30 días de funcionamiento, las eficiencias presentan un comportamiento inestable, pues existen aumentos y disminuciones esporádicas; a partir de este punto se observa un comportamiento que podría describirse como lineal

El raquis acondicionado, constituyó en una barrera física, que sumada con la acción de los sólidos sedimentables previamente retenidos, facilitan la creación de poros

microscópicos, en donde se deposita el material suspendido. Esta acción conjunta justifica la buena remoción de este contaminante.

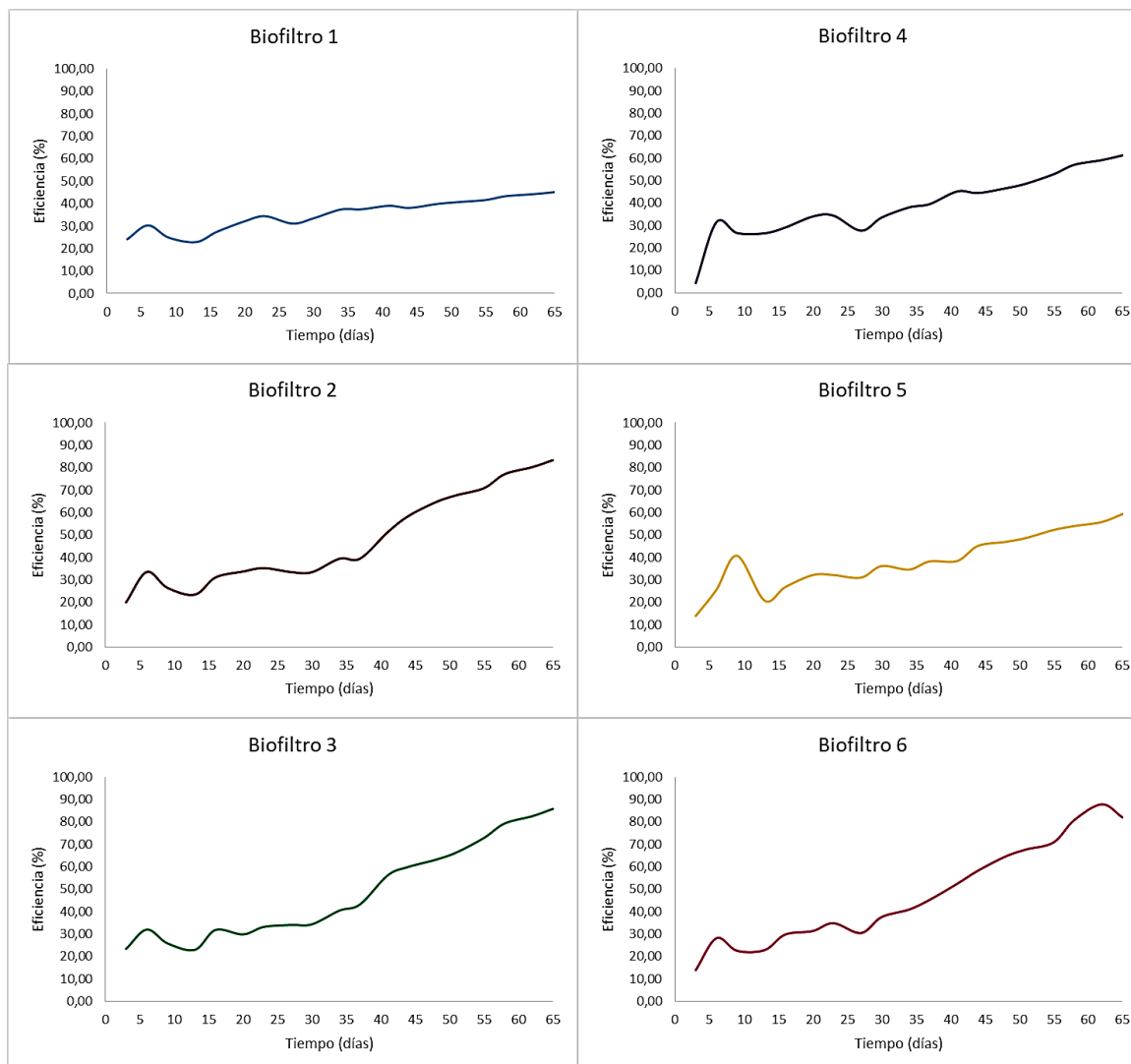
**FIGURA 4.2: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES**



### 4.3.3 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

La alta concentración de SDT es proporcional a la acción corrosiva del afluente residual. Estos están constituidos por iones y coloides con un tamaño menor a  $0,45 \mu\text{m}$ . La problemática ambiental ligada a este parámetro, es que hacen que el agua residual presente color, olor y sabor indeseables (Jiménez Cisneros, 2005).

**FIGURA 4.3: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES**



En la Figura 4.3, se observa que el comportamiento de todos los biofiltros es similar, observándose un incremento constante en la eficiencia. El afluente residual presentó una concentración de 24 800 mg/L, al final del periodo de monitoreo el efluente alcanzó una concentración mínima de 3 552 mg/L en el biofiltro 3, siendo éste el más eficiente con un 85,80% de eficiencia, como es de suponerse por su granulometría más fina y mayor espesor del lecho, que ofrece mayor área superficial de contacto y retención de SDT.

Valores considerables de remoción fueron logrados en el biofiltro 2 con una eficiencia de 83,34% y una concentración final de 4132 mg/L de SDT; por otro lado la concentración máxima se observó en el efluente del biofiltro 1 con una concentración de 13 604 mg/L y una eficiencia del 45,15%. Es importante mencionar la concentración alcanzada en el biofiltro 6 (82% de eficiencia), puesto que es la tercera más baja, con un valor de 4464 mg/L de SDT.

Durante la operación de los biofiltros, la formación de una película biológica, fue importante para los procesos de oxidación, los cuales influyen en la disminución de partículas coloidales y iones; otra razón que podría explicar la disminución de sólidos disueltos totales, es la capacidad de intercambio catiónico, debido a que el raquis acondicionado tiene una buena área específica.

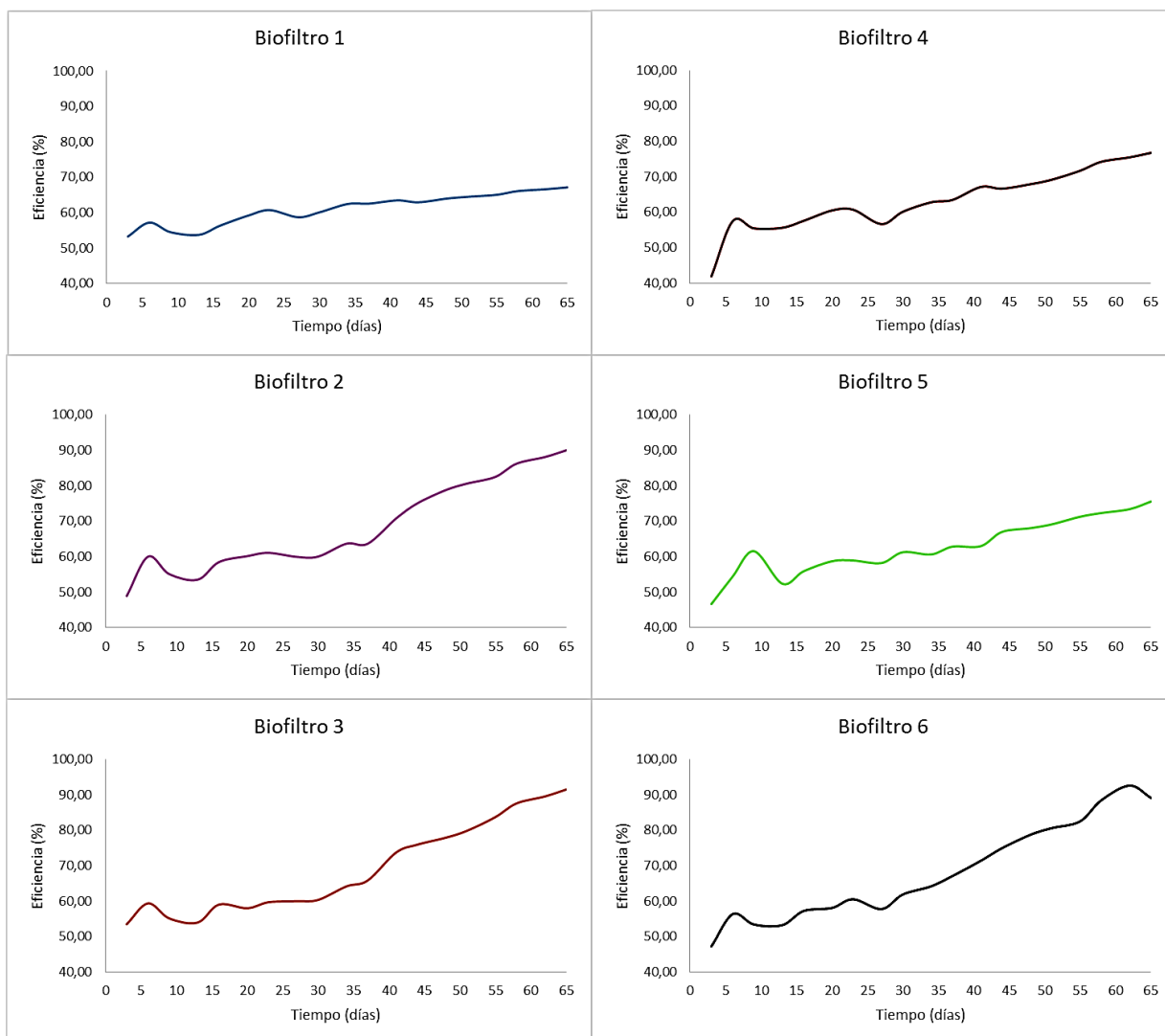
#### **4.3.4 SÓLIDOS TOTALES**

Una alta concentración de ST genera problemas como color, olor, sabor, turbidez, corrosión, entre otros; eso justifica un tratamiento del agua residual antes de ser descargada al cuerpo receptor (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués , & Villalobos Moreno , 2003). El comportamiento de la eficiencia de todos los biofiltros en el tiempo es similar, observándose en la Figura 4.4, que en los primeros 10 días de operación se removi6 más el 50% de ST, a partir de este punto la remoci6n fue creciendo constantemente.

En la Figura 4.4 se puede observar que existen aumentos esporádicos en los ST, se sospecha que esto se debió al desprendimiento de la materia orgánica presente en la biopelícula. Es importante mencionar que la disminuci6n de este parámetro está relacionado mayormente con la remoci6n de SDT, pues el comportamiento en el tiempo de éstos es similar, como se puede observar en la Figuras 4.3 y 4.4. El afluente residual tuvo una concentraci6n de 41 750 mg/L de ST, al final del periodo de monitoreo, los biofiltros que presentaron mayor remoci6n fueron los biofiltros 2 (90,0% de eficiencia) y 3 (91,3% de eficiencia) con concentraciones de 4 174 mg/L y 3 584

mg/L respectivamente. La menor remoción se evidenció en el efluente del biofiltro 1 con una concentración de 13700 mg/L y 67,9% de eficiencia.

**FIGURA 4.4: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA SÓLIDOS TOTALES**



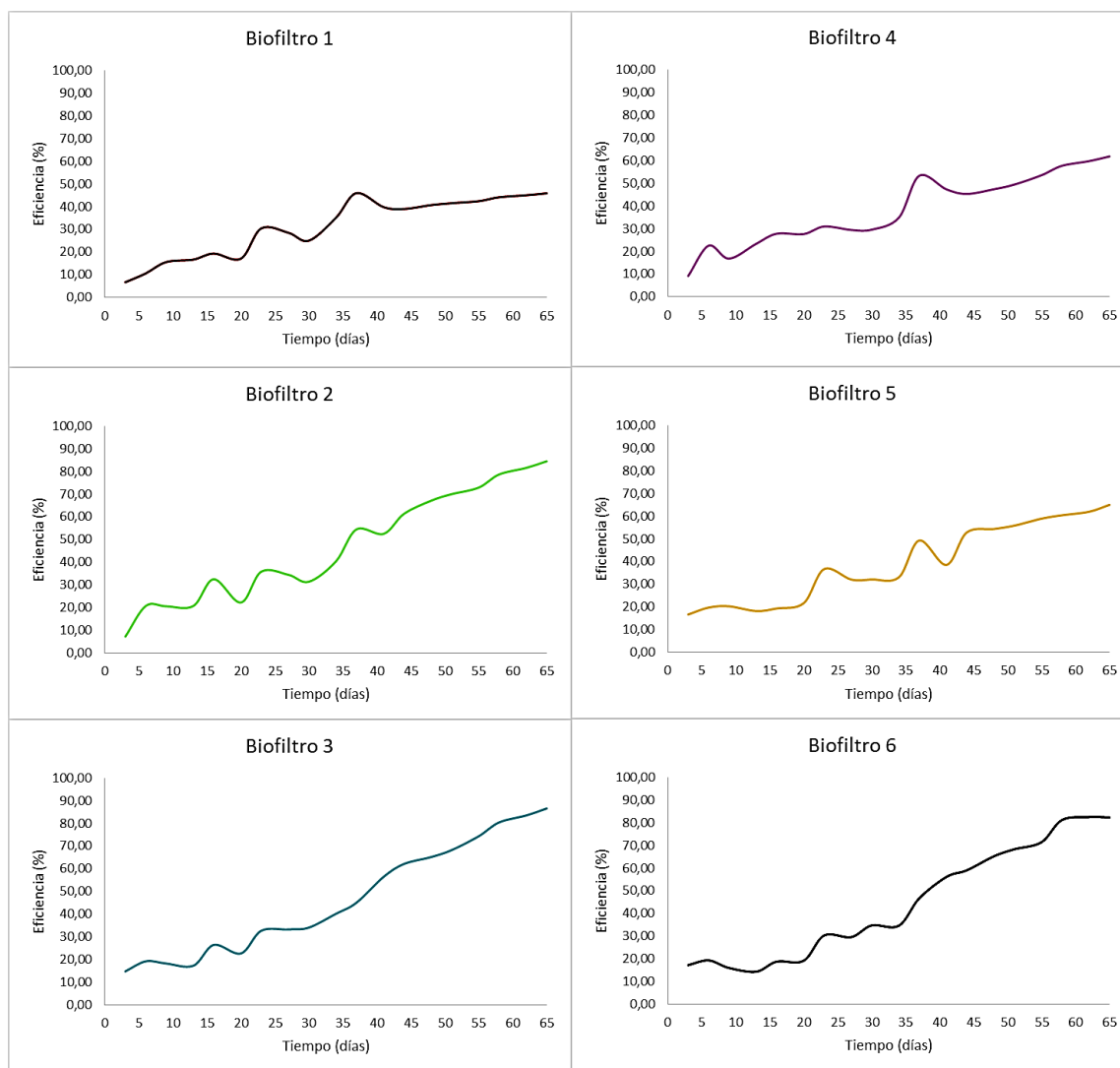
### 4.3.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

La extracción de aceite de palma, se caracteriza por una serie de operaciones unitarias después de las cuales el agua residual tiene un alto contenido de aceite, sólidos en diferentes formas y materia orgánica (FEDEPALMA, 2011), si es descargada al cuerpo



receptor sin un tratamiento, afecta a los niveles de oxígeno disuelto y a la vida acuática del ecosistema (Ramalho, 2003).

**FIGURA 4.5: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO**



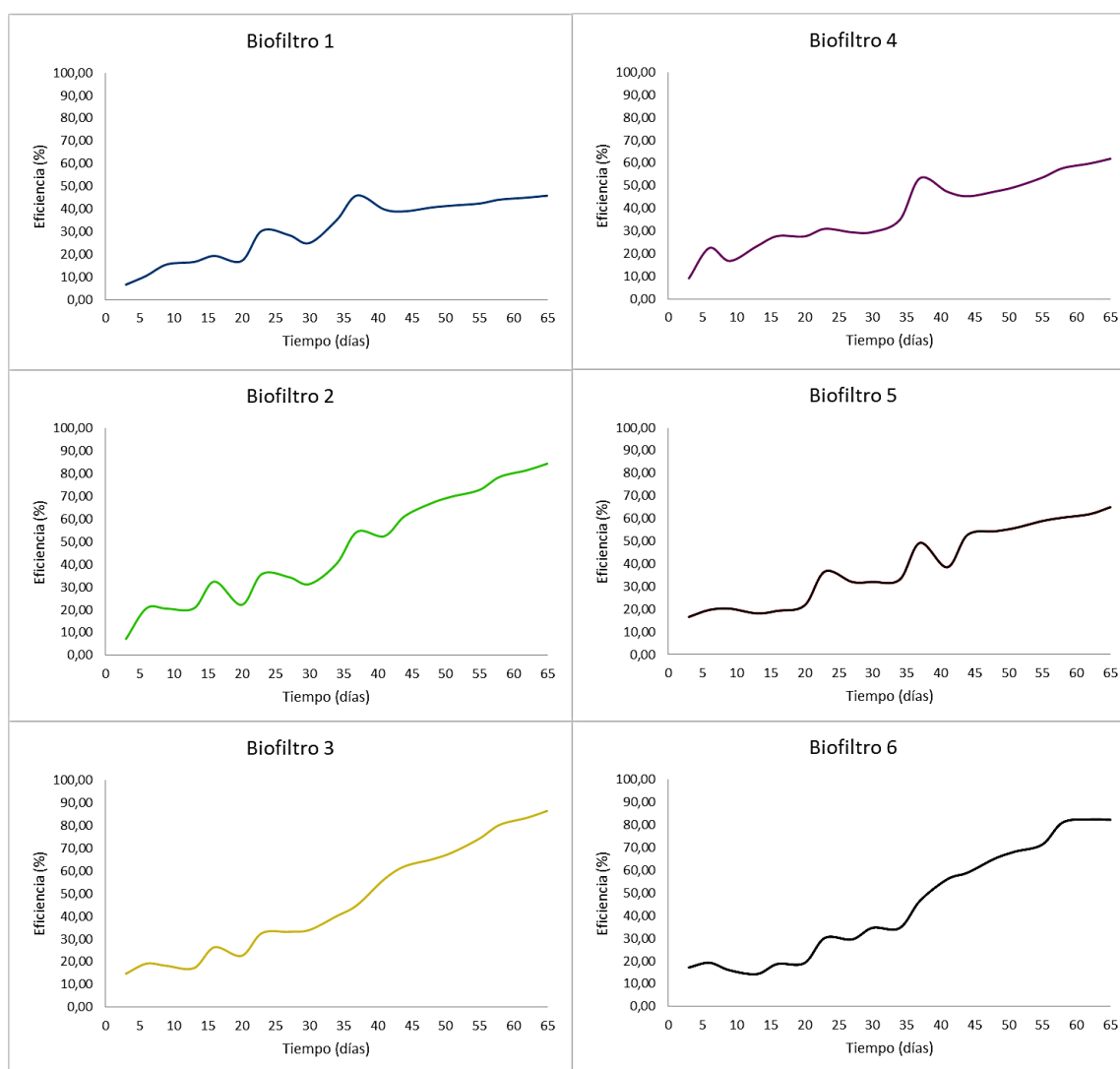
El afluente a los biofiltros tuvo una concentración de DQO de 36 000 mg/L, considerando que la normativa exige un valor de 200 mg/L, se pretendió depurar un líquido con una concentración 180 veces mayor. En la Figura 4.5 se observa que las eficiencias alcanzadas por todos los biofiltros en el último día de monitoreo, no son homogéneas entre sí, variando entre el 40% y 85%.

El biofiltro 3 logró la mayor eficiencia (86,57%), seguido del biofiltro 2 (84,51%) y el biofiltro 6 (82,33%), alcanzando concentraciones de 4 835 mg/L, 5 575 mg/L y 6 360 mg/L de DQO respectivamente. Sin embargo el efluente del biofiltro 1 tuvo 19 485 mg/L de DQO, es decir, solo alcanzó una eficiencia del 45,88%.

#### 4.3.6 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La DBO es una medida de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar biológicamente la materia orgánica biodegradable; tanto de la materia carbonatada y

**FIGURA 4.6: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO**



nitrogenada oxidables, constituyen la fuente de nutrientes de organismos aerobios, lo cual hace factible un tratamiento biológico (Jiménez Cisneros, 2005).

En la Figura 4.6 se puede observar que la remoción de DBO no sigue una tendencia, presentando ciertos picos en los primeros 40 días de tratamiento, evidenciándose aumentos y disminuciones en las eficiencias alcanzadas, que pueden deberse a la acción poco efectiva de los microorganismos en la descomposición de materia orgánica, asociada al pH, pues ésta agua residual es de carácter ácido y pocas especies de microorganismo pueden desarrollarse y operar en estas condiciones; del día 40 en adelante el comportamiento fue estable y creciente.

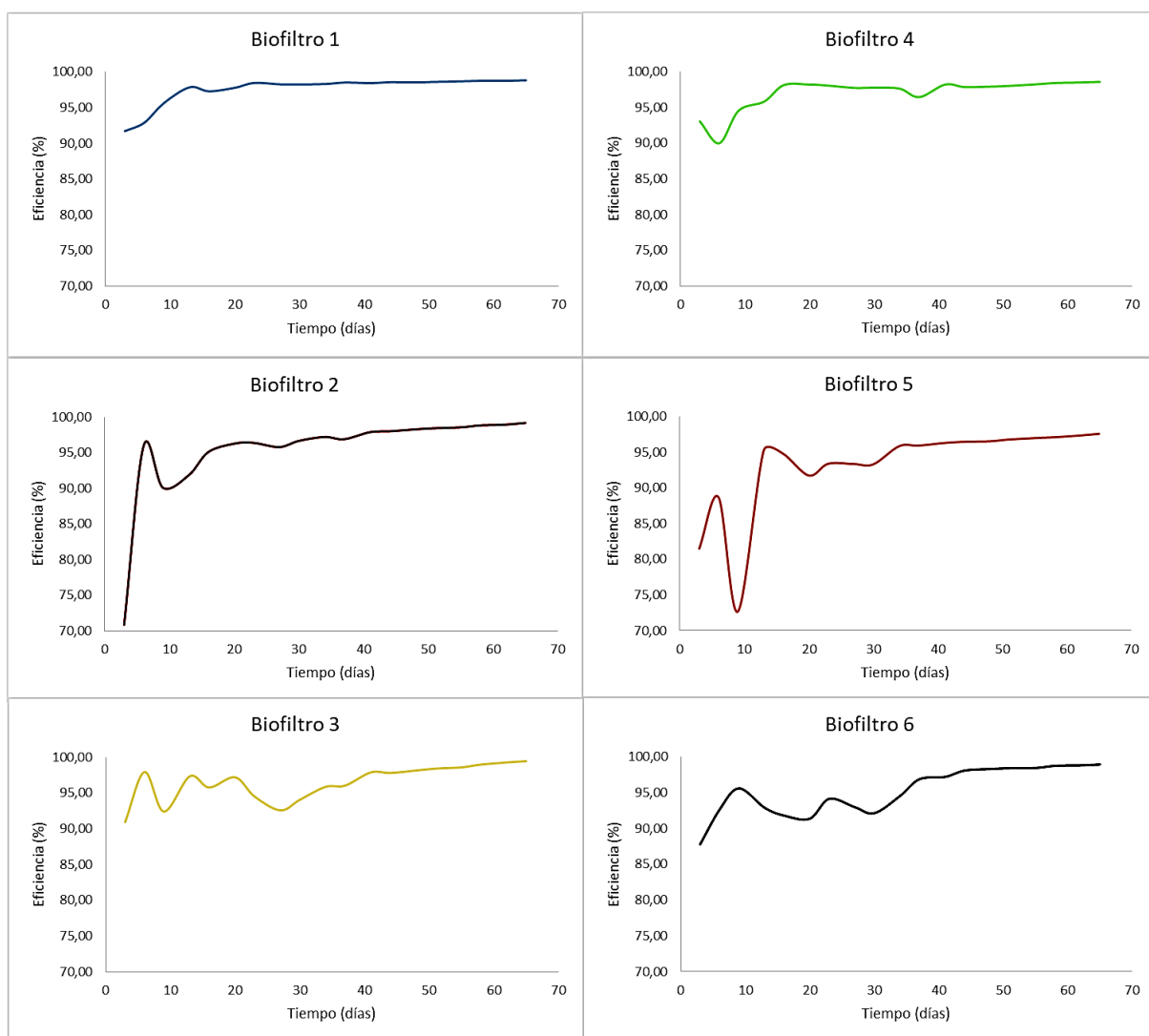
La concentración del afluente fue de 28 800 mg/L de DBO y se lograron valores de 3868 mg/L en el biofiltro 3, con una eficiencia de 86,57%, siendo éste el más eficiente, seguido del biofiltro 2 con una eficiencia de 84,51% (4 460 mg/L de DBO) y el biofiltro 6 con 82,33% de remoción y una concentración de 5 088 mg/L de DBO. Contrariamente, el efluente con la mayor concentración final fue el número 5 con un valor de 15 588 mg/L (45,88%), este resultado puede ser debido a que entre las semanas 5 y 7 se observó un comportamiento atípico, en el que la tasa de infiltración disminuyó, debido a la saturación de los orificios de salida, este percance se resolvió al realizar una correcta limpieza.

#### **4.3.7 GRASAS Y ACEITES**

El afluente a tratar proviene de una industria cuyo producto de valor agregado es el aceite de palma, por dicho motivo el líquido posee una elevada carga de aceites y grasas, cuya estructura química contiene triglicéridos, que son compuestos no polares inmiscibles en el agua, que al ser descargados al cuerpo de agua receptor, perturbarán la vida acuática por la formación de pequeñas películas de grasa y materiales en flotación imperceptibles (Jiménez Cisneros, 2005). Las grasas son estables a la descomposición bacteriana y su presencia disminuye la eficiencia de tratamiento ya que interfiere en proceso aerobios y anaerobios (Ramos Olmos, Sepúlveda Marquéz , & Villalobos Moreno , 2003).

En el sistema de biofiltros, se obtuvo una importante remoción, debido a que el raquis acondicionado actuaba como trampa de grasas y aceites. El afluente a los biofiltros tuvo una concentración de 342,2 mg/L de aceites y grasas y presentaba un olor desagradable, observándose la formación de una película grasosa en la superficie del tanque de alimentación.

**FIGURA 4.7: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS BIOFILTROS PARA ACEITES Y GRASAS**



La Figura 4.7 muestra que todos los biofiltros alcanzaron una eficiencia cercana al 100%, lo que indica el buen comportamiento del raquis acondicionado para este parámetro, notándose además la disminución del olor indeseable. También, se pudo

observar que el biofiltro 1 y 4, 2 y 5, y 3 y 6 tienen un comportamiento similar; de forma general la eficiencia crece de modo estable a partir del día 40 de tratamiento.

En la Figura 4.7 se observa que la mayor remoción se dio en los primeros 10 días del tratamiento, alcanzándose valores mínimos de 1,9 mg/L y 2,8 mg/L en los biofiltros 3 y 2 respectivamente, es decir, el biofiltro más eficiente fue el número 3 con una eficiencia del 99,44%, seguido del número 2 (99,17%). El biofiltro que logró la menor remoción fue el número 5, con una concentración final de 8,2 mg/L, equivalente a una eficiencia del 97,62%.

#### **4.3.8 POTENCIAL DE HIDRÓGENO**

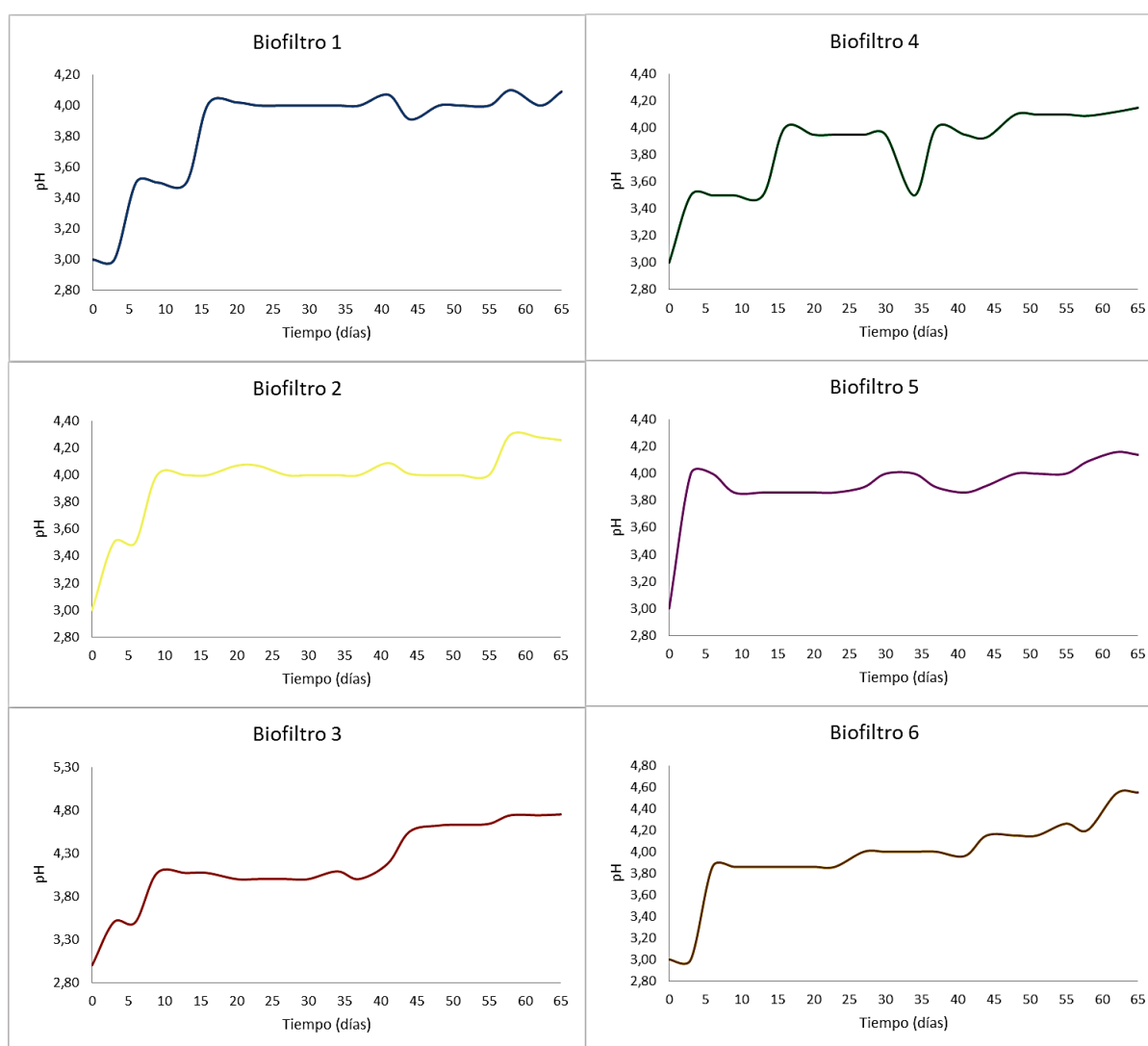
El aceite rojo de palma, se caracteriza por tener un pH cercano a 4 y una acidez de 2,20%, su principal ácido graso es el palmítico; debido a pérdidas durante el proceso de extracción y recuperación de aceite, se observa su presencia en las aguas residuales, reflejado como aceites y grasas, alcanzando concentraciones de hasta 342,3 mg/L. En consecuencia el pH de los efluentes residuales suele ser bajo, es decir, de naturaleza ácida (NEGCORPBIS S.A., 2012).

Las aguas con pH muy ácidos o muy alcalinos son corrosivas e incrustantes respectivamente y pueden alterar las características biológicas del cuerpo receptor, si éste no tiene o tiene baja capacidad amortiguadora de ácidos o álcalis, respectivamente, disminuyendo la población de todas las cadenas tróficas líticas e incluso puede llegar a la esterilidad de peces (Jiménez Cisneros, 2005). Desde un enfoque depurativo, el pH influye en la neutralización y en procesos biológicos anaerobios dificultando el tratamiento biológico del agua, ya que los microorganismos necesitan un medio con un pH de 6,5 a 9 (MAE, 2017).

El afluente a los biofiltros presentó un valor de pH inicial de 3,00, al finalizar el monitoreo, el efluente menos ácido fue el del biofiltro 3, con un pH de 4,75; valores adyacentes de pH son los registrados por los biofiltros 2 y 6, con valores de 4,26 y 4,55 respectivamente. El Biofiltro 1 tuvo la variación más baja, con un valor de 4,09.

En la Figura 4.8 se puede observar que la mayor pendiente se encuentra en los primeros 10 días de tratamiento, posterior a esto, el aumento del pH es poco significativo. Adicionalmente, es importante mencionar que existen fluctuaciones en el comportamiento del pH por ende, el aumento del mismo no sigue una tendencia lineal. En general el pH no registró valores cercanos a la neutralidad, lo que evidencia una baja capacidad de neutralización del raquis acondicionado.

**FIGURA 4.8: COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO**

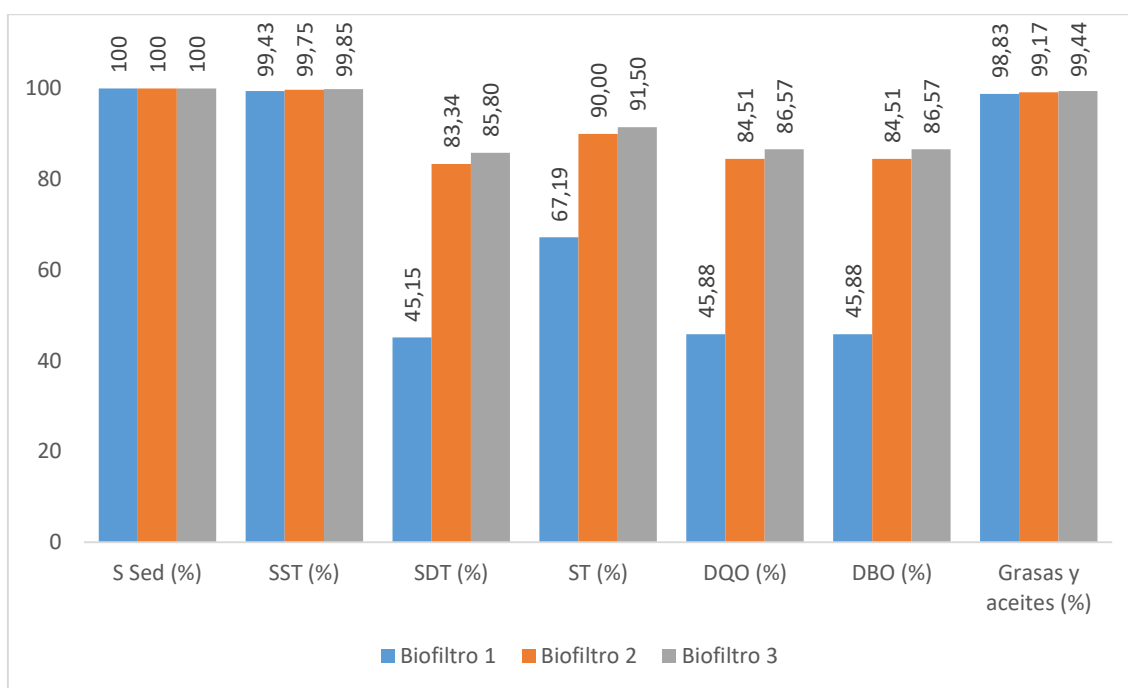


## 4.4 COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS ALCANZADAS

### 4.4.1 EFICIENCIA DE LOS BIOFILTROS SEGÚN EL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE

Los Biofiltros 1, 2 y 3 trabajaron con el raquis acondicionado con granulometría 1, descrita en la Tabla 3.2: Granulometría del raquis acondicionado. De la Figura 4.9 se pueden obtener las siguientes observaciones:

**FIGURA 4.9: INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL LECHO PARA LA GRANULOMETRÍA 1**

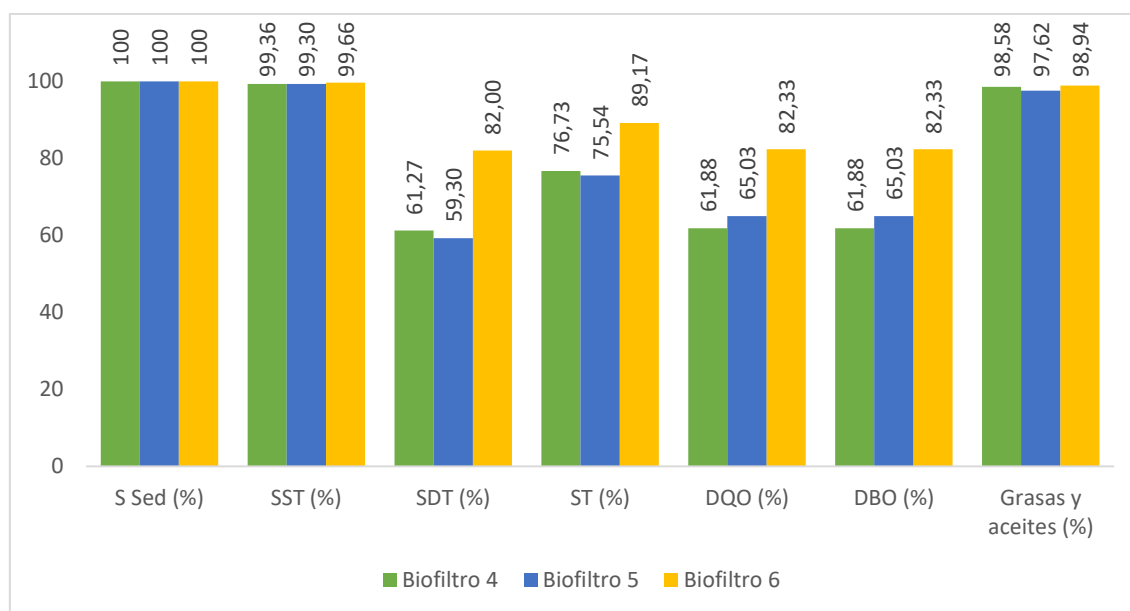


- En los parámetros de SSed, SST y grasas y aceites se tienen eficiencias entre el 99% y 100%, lo que podría indicar que para estos parámetros, el espesor del lecho no juega un papel determinante en la remoción de los mismos.
- En el caso de sólidos disueltos, sólidos totales, DQO y DBO se observa que la eficiencia es proporcional al espesor del lecho filtrante, es decir, el biofiltro con el espesor de 60 cm tiene mayor eficiencia de remoción para los parámetros mencionados.

- Se observa además que para SDT, DQO y DBO, entre el menor y el mayor espesor existe una diferencia aproximada del 40% y en el caso de sólidos totales dicha diferencia es del 25%.

Los Biofiltros 4, 5 y 6 trabajaron con el raquis acondicionado con granulometría 2, descrita en la Tabla 3.2: Granulometría del raquis acondicionado. De la Figura 4.10 se pueden obtener las siguientes observaciones:

**FIGURA 4.10: INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL LECHO PARA LA GRANULOMETRÍA 2**



#### 4.4.2 BIOFILTRO MÁS EFICIENTE

A lo largo del periodo de monitoreo se obtuvieron datos cuantitativos de la remoción de los parámetros de control en cada biofiltro, a partir de ello se pudieron calcular las eficiencias del sistema de biofiltros para cada parámetro, como lo evidencia la Tabla 4.3.



**TABLA 4. 3: RESUMEN DE LAS EFICIENCIAS ALCANZADAS POR LOS BIOFILTROS**

Parámetro	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
S Sed (%)	100	100	100	100	100	100
SST (%)	99,43	99,75	99,85	99,36	99,30	99,66
SDT (%)	45,15	83,34	85,80	61,27	59,30	82,00
ST (%)	67,19	90,00	91,50	76,73	75,54	89,17
DQO (%)	45,88	84,51	86,57	61,88	65,03	82,33
DBO (%)	45,88	84,51	86,57	61,88	65,03	82,33
Grasas y aceites (%)	98,83	99,17	99,44	98,58	97,62	98,94

En base a la Tabla 4.3 se elaboró la Tabla 4.4 para determinar cuál es el biofiltro más eficiente para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma. Para ello se asignan valores de entre 0 y 1 a cada biofiltro, siendo 1 el mejor escenario, es decir, cuando el biofiltro ha alcanzado una eficiencia igual al 100% en el parámetro de interés. Resultando ser el biofiltro 3 el más eficiente.

**TABLA 4.4: PONDERACIÓN DE LA EFICIENCIAS**

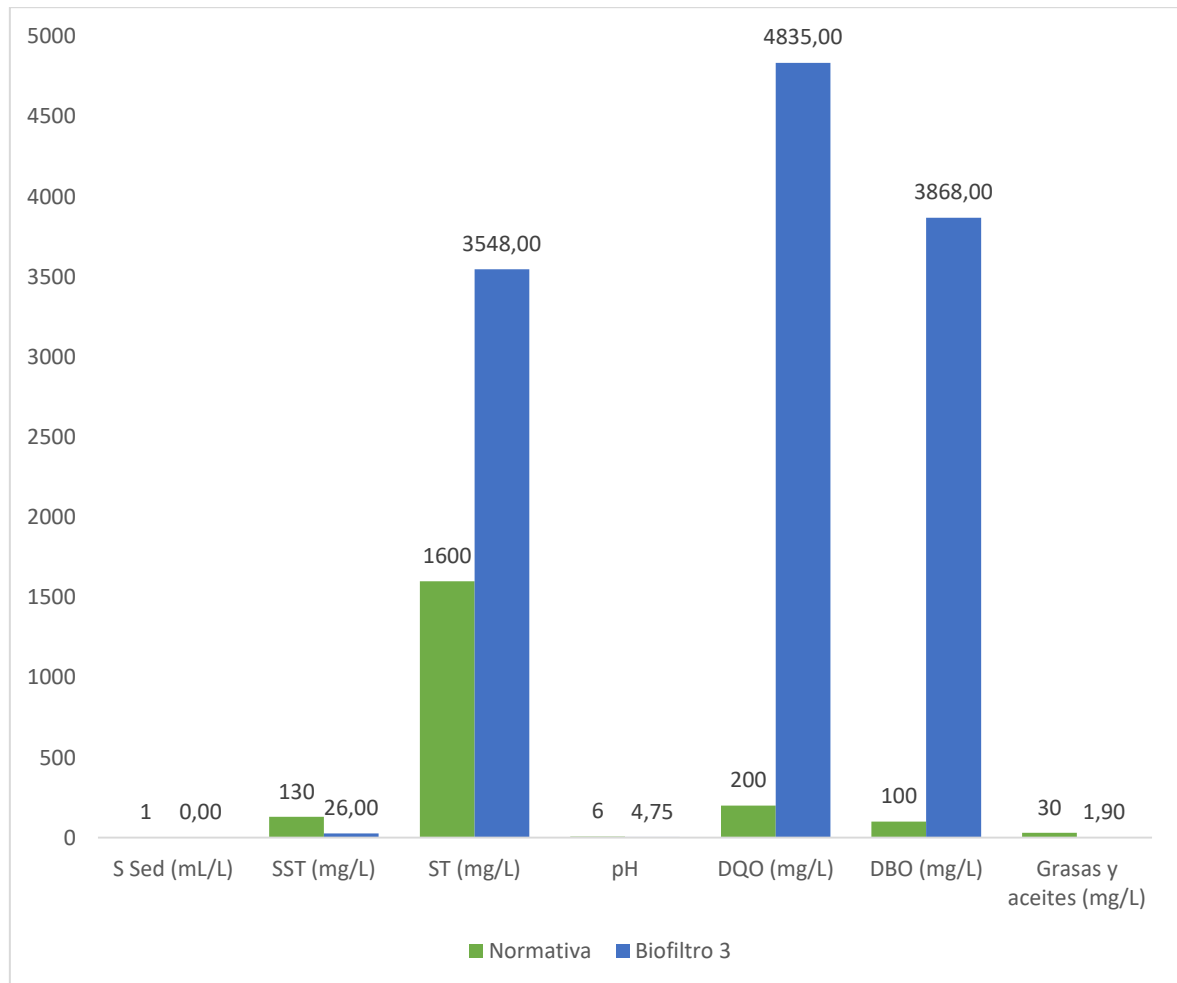
Parámetro	VALOR						Máxima eficiencia
	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6	
S Sed (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100
SST (%)	0,99	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	100
SDT (%)	0,45	0,83	0,86	0,61	0,59	0,82	100
ST (%)	0,67	0,90	0,92	0,77	0,76	0,89	100
DQO (%)	0,46	0,85	0,87	0,62	0,65	0,82	100
DBO (%)	0,46	0,85	0,87	0,62	0,65	0,82	100
Grasas y aceites (%)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	100
<b>SUMATORIA</b>	<b>5,02</b>	<b>6,41</b>	<b>6,50</b>	<b>5,60</b>	<b>5,62</b>	<b>6,34</b>	

#### 4.5 GRADO DE CUMPLIMIENTO CON LA NORMATIVA AMBIENTAL

Como se puede observar en la Tabla 4.3, el biofiltro 3 es el más eficiente, motivo por cual los valores alcanzados por el efluente del mismo, serán comparados con la normativa. En la Figura 4.11, se puede observar que los parámetros que cumplen con

la normativa son: SSed, SST y aceites y grasas, mientras que los que no cumplen son: ST, pH, DBO y DQO.

### COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA VIGENTE



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización del efluente residual de la extractora Palmar del Río, mostró que los parámetros a evaluar sobrepasan la normativa vigente, observándose que la carga contaminante era hasta 300 veces mayor a los límites máximos permisibles para descarga a cuerpos de agua dulce, en el caso de sólidos sedimentables y DBO.
- El espesor del lecho fue un parámetro determinante en la eficiencia de remoción de parámetros como sólidos disueltos, sólidos totales, DQO y DBO, para las dos granulometrías; observándose que en la granulometría 1, el incremento en la eficiencia fue más evidente que en el caso de los biofiltros que operaron con el raquis acondicionado con granulometría 2.
- La granulometría juega un papel importante en el funcionamiento de los biofiltros, pues se observó que los dos biofiltros más eficientes estaban constituidos por raquis con granulometría 1, es decir, que una granulometría más fina está asociada a una mayor remoción de contaminantes.
- Los parámetros de sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y grasas y aceites alcanzaron eficiencias entre el 97% y 100% de remoción en todos los biofiltros, lo que indica que para estos parámetros, el espesor del lecho no juega un papel determinante en su remoción.
- El Biofiltro 3 fue el más eficiente, presentando eficiencias en un rango de 85% al 100% dependiendo del parámetro, la mayor remoción se alcanzó para sólidos suspendidos totales y grasas y aceites (mayor a 99%) y la menor en sólidos disueltos (85,8%); a pesar de las eficiencias alcanzadas, no se logró que todos los parámetros evaluados cumplan con la normativa, siendo DBO y DQO los más críticos.
- Uno de los parámetros que no logró cumplir la normativa es el pH, éste influyó directamente en el rendimiento de la película biológica formada en el raquis

acondicionado, razón por la cual varios parámetros, como la DBO, se vieron influenciados negativamente.

- El uso del raquis como lecho filtrante para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma sí es viable, ya que de forma general se alcanza eficiencias superiores al 50 % en la remoción de los parámetros evaluados, sin embargo, el efluente tratado necesita un proceso adicional para poder ser descargado a un cuerpo receptor.
- El agua residual usada en esta experimentación proviene de una piscina cuya función es retener grasas y lodos, sin embargo, se evidenció que tiene una elevada concentración de sólidos y aceites y grasas, razón por la cual se puede inferir que este pretratamiento no es eficiente influyendo negativamente en la línea de tratamiento del agua residual de la empresa Palmar del Río.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Para lograr que todos los parámetros evaluados logren cumplir la normativa, se recomienda estabilizar el pH del afluente que alimenta los biofiltros mediante reacciones de neutralización, a través de un lecho granular de piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), o a través de la recirculación del efluente tratado, para que el metabolismo de los microorganismos no se vea afectado.
- Podría hacerse un estudio de optimización del sistema propuesto, con la visión de incrementar la eficiencia de tratamiento mediante la operación de los biofiltros en serie, o a su vez diseñando los biofiltros con un rango variado de granulometrías, de preferencia menores a las utilizadas en este trabajo.
- El efluente tratado tiene una alta concentración de materia orgánica disuelta, por ello se recomienda un post-tratamiento de oxidación biológica, tomando en cuenta parámetros de diseño como carga orgánica, caudal y pH.
- El estudio posterior acerca de parámetros de control más finos, como lo son la conductividad, nutrientes, oxígeno disuelto, ayudaría a relacionar la acción del raquis con procesos implicados en su superficie como intercambio catiónico, adsorción, absorción, entre otros.

- Debería implementarse un sistema de sedimentación eficiente previo al ingreso del agua residual a los biofiltros, para evitar la pronta saturación con SSed, alargando el tiempo de vida de este sistema de tratamiento.
- Para la implementación de un sistema de biofiltración con lecho filtrante de raquis a escala piloto o industrial se recomienda la trituración del mismo, ya que se observó que con una granulometría más fina se logran mayores eficiencias.
- La empresa debería implementar mejoras en sus operaciones unitarias, de modo que se recupere la mayor cantidad de aceites y grasas y se utilice la menor cantidad de agua, en consecuencia, el efluente residual sería menor en volumen y con menor carga contaminante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arana Ysa, V. (octubre de 2010). *Guía para la toma de decisiones en la selección de sistemas de tratamientos de aguas residuales no convencionales*. Lima, Perú: A-4 Impresores.
- Balboa Acero, N. M. (2015). *Determinación de pérdidas de aceite del proceso de prensado en la extracción de aceite en ALCOPALMA.S.A. Poyecto de titulación* . Quito, Ecuador : Universidad Central del Ecuador .
- Blanco Sepúlveda, R. (1999). *El infiltrómetro de cilindro dimple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea*. España.
- Bonomie, M., & Reyes , M. (2012). *Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma* . TeloS, 323-332.
- CENIPALMA. (1996). *Manejo de efluentes de plantas extractoras: Arranque, operación y mantenimiento de lagunas de estabilización*. Santafé de Bogotá: Oficina de Comunicaciones de FEDEPALMA.
- CFN. (Septiembre de 2017). *Ficha Sectorial: Cultivo de Palmas de aceite (Palma Africana)*. GDGE – Subg. de Análisis e Información.
- COSUDE. (abril de 2006). *Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades*. Nicaragua : AZER Impresos.
- Deloya Martínez, A. (s.f.). *Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno*. *Tecnología en marcha*, 57-59.
- Eugenio Guzmán, V. Y. (septiembre de 2017). *Estudio de optimización de un sistema de biofiltración con material de empaque de lantana camara y residuo de mora para remoción de nutrientes en aguas residuales domiciliarias*. Poyecto de titulación. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- FEDEPALMA . (febrero de 2011). *Guía Ambiental para el Subsector de la Agroindustria de la Palma de Aceite* . Bogotá, Colombia.
- Galli Merino, Ó., & Sal, F. M. (2007). *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua*. Corrientes, Argentina.
- Garzón Zúñiga, M., Buelna, G., & Moeller Chávez, G. (2012). *La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias*. *Tecnología y Ciencias del Agua* , 153-161.

- González Valenzuela, M. (24 de junio de 2016). *Contactador Biológico Rotativo*. Recuperado el 10 de marzo de: *Tratamiento del agua*: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/contactador-biologico-rotativo/>
- Jiménez Cisneros, B. E. (2005). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México : LIMUSA, S.A.
- MAE. (2013). *Estudio de potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con la sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador*. Ecuador.
- MAE. (2017). *Anexo I del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Recurso Agua*. Ecuador.
- MAGAP. (2013). *Boletín Situacional 2013. Palma Africana*. Recuperado el 22 de marzo de 2018 de: [http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2013/palma\\_africana.pdf](http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2013/palma_africana.pdf)
- MAGAP. (2015). *Boletín Situacional 2015. Palma aceitera*. Recuperado el 12 de febrero de 2018 de: [http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2016/boletin\\_situacional\\_palma\\_aceitera\\_2015.pdf](http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2016/boletin_situacional_palma_aceitera_2015.pdf)
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales : tratamiento, vertido y reutilización*. Singapore: McGraw Hill.
- Morales Fiallos, F. R., Medina Robalino, W. S., & Paredes Beltrán , B. E. (2017). *Biofiltración sobre cama de turba, para el tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado de jeans*. *Revista Publicando*, 1-12.
- Muñoz Perreño, G. E. (marzo de 2016). *Optimización del proceso de extracción de aceite rojo de plama de acite en la empresa "Hermanos Muñoz"*. Proyecto de titulación. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Narváez Guerrero, E. E. (Abril de 2015). *Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para la extracción del aceite crudo de palma*. Proyecto de titulación. Quito, Ecuador: Colegio de Ciencias e Ingeniería de la Universidad San Francisco de Quito.
- NEGCORPBIS S.A. (Diciembre de 2012). *Estudio de Impacto Ambiental Expost: Proyecto: "Palmicultor, Palmar del Rio, NEGCORPBIS S. A. Bloque 1 – Planta Extractora"*. Coca, Ecuador.
- Pacheco Toro, R. S. (2015). *Biopercolación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales tipo domésticas*. Proyecto de Titulación. Quito, Ecuador: UDLA: Facultad de Ciencias Agropecuarias.

- Páliz Hidalgo, D. C. (2014). *Factibilidad del uso del raquis de palma africana en mezcla con agregados de construcción para la fabricación de ladrillos ecológicos*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Posada Uribe, L. F., & Mosquera López, S. (2007). *Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas*. Proyecto de Titulación. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.
- Potter, L. (2011). *La industria del aceite de palma en Ecuador: ¿un buen negocio para los pequeños agricultores?* Recuperado el 5 de abril de 2018 de FLACSO: <http://revistas.flacsoandes.edu.ec/eutopia/article/view/1028/948>
- PRO ECUADOR. (2014). *Análisis sectorial: Aceite de palma y elaborados 2014*. Quito
- Ramalho, S. R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. España: EDITORIAL REVERTÉ, S.A.
- Ramírez Contreras, N. E., Silva Ramírez, Á. S., Garzón González, E. M., & Yáñez Angarita, E. E. (Diciembre de 2011). *Boletín Técnico N°30: Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*. Bogotá: CENIPALMA.
- Ramos Olmos, R., Sepúlveda Marquéz, R., & Villalobos Moreno, F. (2003). *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. México: Plaza y Valdéz.
- Reinosa Pulido, D. C. (2009). *Costos ambientales en el proceso de extracción del aceite de palma: Estudio de un caso*. *Revista Venezolana de Gerencia (online)*, 228-247. Recuperada el 24 de enero de 2018 de: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1315-99842009000200006](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-99842009000200006)
- Reyes, J. V. (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*, 41-56.
- Sagrario Castillo, G. A. (2015). *Eliminación de nutrientes mediante tratamientos de biopelícula*. Tesis doctoral. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.



## **ANEXOS**

## **ANEXO N°1**

### **RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE TRATADO**



**TABLA A1.2: CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES DEL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	SST (mg/L)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	16950	16950	16950	16950	16950	16950
3	680	1480	420	528	916	668
6	584	208	96	760	560	404
9	360	504	352	414	1352	240
13	176	414	124	316	234	388
16	222	250	196	142	256	448
20	182	190	130	136	408	472
23	126	184	254	148	326	320
27	142	214	344	172	328	384
30	144	170	276	170	330	430
34	138	142	192	180	204	298
37	122	158	184	270	200	170
41	128	108	98	136	182	152
44	118	102	102	162	174	104
48	120	88	86	158	170	92
51	114	80	74	150	158	86
55	108	74	66	134	148	84
58	102	60	48	120	142	68
62	102	54	34	114	130	64
65	96	42	26	108	118	58

**TABLA A1.3: CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES DEL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	SDT (mg/L)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	24800	24800	24800	24800	24800	24800
3	18810	19850	18988	23728	21356	21344
6	17272	16492	16856	17000	18468	17816
9	18620	18244	18376	18186	14700	19202
13	19120	18996	19088	18216	19648	19128
16	17992	17090	16900	17582	18162	17406
20	16840	16444	17394	16364	16832	17020
23	16256	16064	16566	16260	16826	16150
27	17080	16508	16350	17930	17116	17240
30	16506	16516	16272	16482	15840	15478
34	15522	15024	14760	15356	16230	14642
37	15498	15014	14072	14986	15316	13566
41	15112	12098	10870	13590	15276	11790
44	15342	10320	9936	13768	13606	10352
48	14908	8776	9136	13248	13166	8788
51	14702	8010	8334	12730	12736	8008
55	14474	7230	6730	11690	11850	7220
58	14044	5684	5130	10648	11418	4750
62	13822	4908	4328	10126	10970	3016
65	13604	4132	3522	9606	10094	4464

**TABLA A1.4: CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DEL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	ST (mg/L)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	41750	41750	41750	41750	41750	41750
3	19490	21330	19408	24256	22272	22012
6	17856	16700	16952	17760	19028	18220
9	18980	18748	18728	18600	16052	19442
13	19296	19410	19212	18532	19882	19516
16	18214	17340	17096	17724	18418	17854
20	17022	16634	17524	16500	17240	17492
23	16382	16248	16820	16408	17152	16470
27	17222	16722	16694	18102	17444	17624
30	16650	16686	16548	16652	16170	15908
34	15660	15166	14952	15536	16434	14940
37	15620	15172	14256	15256	15516	13736
41	15240	12206	10968	13726	15458	11942
44	15460	10422	10038	13930	13780	10456
48	15028	8864	9222	13406	13336	8880
51	14816	8090	8408	12880	12894	8094
55	14582	7304	6796	11824	11998	7304
58	14146	5744	5178	10768	11560	4818
62	13924	4962	4362	10240	11100	3080
65	13700	4174	3548	9714	10212	4522

**TABLA A1.5: DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DEL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	DQO (mg/L)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	36000	36000	36000	36000	36000	36000
3	33600	33400	30700	32700	30000	29800
6	32200	28550	29100	27900	28900	29050
9	30400	28600	29450	29950	28700	30250
13	30000	28550	29800	27600	29450	30850
16	29050	24300	26500	26000	29050	29250
20	29850	28000	27850	26050	28200	29100
23	25050	23100	24250	24850	22800	25100
27	25750	23600	24050	25400	24450	25350
30	27000	24700	23750	25350	24440	23500
34	23350	21450	21550	23450	24100	23550
37	19450	16400	19800	16800	18250	19200
41	21675	17100	15700	18950	22125	15800
44	21975	13925	13650	19675	16975	14750
48	21355	11840	12550	18930	16425	12520
51	21055	10800	11450	18190	15890	11410
55	20730	9755	9245	16705	14785	10285
58	20110	7670	7048	15215	14245	6770
62	19790	6625	5945	14470	13685	6300
65	19485	5575	4835	13725	12590	6360

**TABLA A1.6: DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DEL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	DBO (mg/L)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	28800	28800	28800	28800	28800	28800
3	26880	26720	24560	26160	24000	23840
6	25760	22840	23280	22320	23120	23240
9	24320	22880	23560	23960	22960	24200
13	24000	22840	23840	22080	23560	24680
16	23240	19440	21200	20800	23240	23400
20	23880	22400	22280	20840	22560	23280
23	20040	18480	19400	19880	18240	20080
27	20600	18880	19240	20320	19560	20280
30	21600	19760	19000	20280	19552	18800
34	18680	17160	17240	18760	19280	18840
37	15560	13120	15840	13440	14600	15360
41	17340	13680	12560	15160	17700	12640
44	17580	11140	10920	15740	13580	11800
48	17084	9472	10040	15144	13140	10016
51	16844	8640	9160	14552	12712	9128
55	16584	7804	7396	13364	11828	8228
58	16088	6136	5638	12172	11396	5416
62	15832	5300	4756	11576	10948	5040
65	15588	4460	3868	10980	10072	5088



**TABLA A1.7: CONCENTRACIÓN DE ACEITES Y GRASAS DEL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	Aceites y Grasas (mg/L)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	342,3	342,3	342,3	763,8	342,3	342,3
3	28,3	99,7	31,0	23,8	63,3	41,8
6	24,3	14,0	7,1	34,2	38,7	25,3
9	15,0	34,0	26,0	18,7	93,5	15,0
13	7,3	27,9	9,2	14,2	16,2	24,3
16	9,2	16,8	14,5	6,4	17,7	28,0
20	7,6	12,8	9,6	6,1	28,2	29,5
23	5,3	12,4	18,8	6,7	22,5	20,0
27	5,9	14,4	25,4	7,8	22,7	24,0
30	6,0	11,5	20,4	7,7	22,8	26,9
34	5,8	9,6	14,2	8,1	14,1	18,6
37	5,1	10,6	13,6	12,2	13,8	10,6
41	5,3	7,3	7,2	6,1	12,6	9,5
44	4,9	6,9	7,5	7,3	12,0	6,5
48	5,0	5,9	6,4	7,1	11,8	5,8
51	4,8	5,4	5,5	6,8	10,9	5,4
55	4,5	5,0	4,9	6,0	10,2	5,3
58	4,3	4,0	3,5	5,4	9,8	4,3
62	4,3	3,6	2,5	5,1	9,0	4,0
65	4,0	2,8	1,9	4,9	8,2	3,6

**TABLA A1.8: POTENCIAL DE HIDRÓGENO EN EL EFLUENTE TRATADO DURANTE EL MONITOREO DE LOS BIOFILTROS**

Tiempo (días)	pH					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
3	3,00	3,50	3,50	3,50	4,00	3,00
6	3,50	3,50	3,50	3,50	4,00	3,86
9	3,50	4,00	4,07	3,50	3,86	3,86
13	3,50	4,00	4,07	3,50	3,86	3,86
16	4,01	4,00	4,07	4,00	3,86	3,86
20	4,02	4,07	4,00	3,95	3,86	3,86
23	4,00	4,07	4,00	3,95	3,86	3,86
27	4,00	4,00	4,00	3,95	3,90	4,00
30	4,00	4,00	4,00	3,95	4,00	4,00
34	4,00	4,00	4,09	3,50	4,00	4,00
37	4,00	4,00	4,00	4,00	3,90	4,00
41	4,07	4,09	4,18	3,95	3,86	3,96
44	3,91	4,01	4,55	3,93	3,91	4,15
48	4,00	4,00	4,62	4,10	4,00	4,15
51	4,00	4,00	4,63	4,10	4,00	4,15
55	4,00	4,00	4,64	4,10	4,00	4,26
58	4,10	4,30	4,74	4,09	4,09	4,20
62	4,00	4,28	4,74	4,12	4,16	4,54
65	4,09	4,26	4,75	4,15	4,14	4,55

**ANEXO N°2**

**SOLICITUD DIRIGIDA AL GERENTE GENERAL DE NEGCORPBIS S.A.  
EMPRESA AGROINDUSTRIAL**



ESCUELA  
POLITECNICA  
NACIONAL

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Quito, 30 de octubre de 2017

Señor  
Juan Alberto Salgado Albán  
GERENTE GENERAL  
NEGCORPBIS S.A. EMPRESA AGROINDUSTRIAL  
Presente.

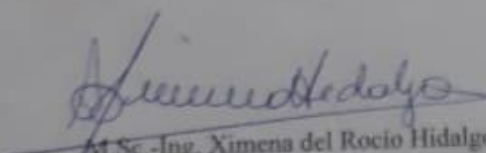
De mi consideración:

Con un cordial saludo, desde esta Institución de Educación Superior, me permito solicitar a Usted, autorizar a dos estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental, señorita Wendy Sangucho y señor Abraham Rodríguez, para que como proyecto de titulación, realicen el Diagnóstico Ambiental del Sistema de Tratamiento de los Efluentes Líquidos de la Empresa Palmar del Río (PDR), a través de la evaluación de parámetros físicos y químicos en las descargas de las líneas de producción, de los lodos resultantes del sistema de tratamiento, de los efluentes tratados y del cuerpo receptor.

Como es de esperar, todos los datos generados y resultados obtenidos, serán entregados a la empresa Palmar del Río (PDR), a través de un Resumen Ejecutivo.

Por la atención que se digne dar a esta comunicación, anticipo mis agradecimientos.

Atentamente,



M.Sc.-Ing. Ximena del Rocio Hidalgo Bustamante.  
DECANA



**ANEXO N°3**  
**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN CAMPO Y**  
**EN EL LABORATORIO**

**FOTO A3.1: VISITA TÉCNICA A LAS INSTALACIONES DE LA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO**



**FOTO A3.2: RECEPCIÓN DE LOS RACIMOS DE FRUTO FRESCO (RFF) EN LAS INSTALACIONES DE LA EXTRACTORA PALMAR DEL RÍO**



**FOTO A3.3: TANQUES FLORENTINOS EN SERIE**



**FOTO A3.4: PISCINA N°1, PISCINA DE TRAMPA DE GRASAS Y LODOS**



**FOTO A3.5: PISCINA N°2, PISCINA ACIDOGÉNICA**



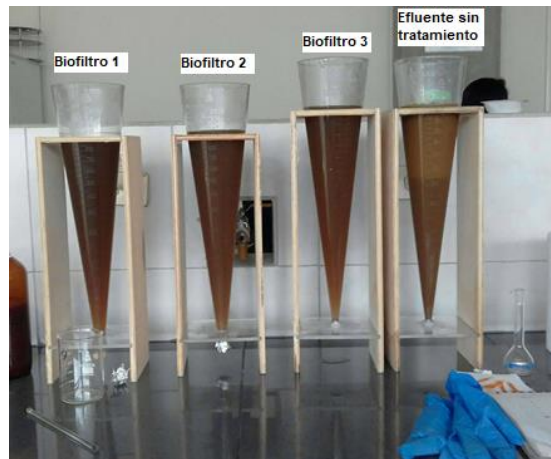
**FOTO A3.6: MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DE LOS BIOFILTROS DE PLÁSTICO DE BOTELLAS RECICLADAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)**



**FOTO A3. 7: PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DEL RAQUIS**





**FOTO A3. 8: ENSAMBLADO DE LOS BIOFILTROS****FOTO A3. 9: ENSAYO DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES****FOTO A3.10: ENSAYO DE SÓLIDOS Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO**