Evaluación de la Capacidad de Depuración Biológica de un Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite Empleando un Soporte a Partir de Cuesco de Palma a Escala de Laboratorio

Gelves Gamboa María Camila

Universidad de Santander

Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agropecuarias

Programa de Microbiología Industrial

Bucaramanga

2021

Evaluación de la Capacidad de Depuración Biológica de un Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite Empleando un Soporte a Partir de Cuesco de Palma a Escala de Laboratorio

Gelves Gamboa María Camila

Trabajo de Grado Presentado como Requisito para Optar al Título de Microbióloga Industrial

Director

Chacín Zambrano Christian Andrei

Magíster en Biotecnología Microbiana

Codirector

Rodríguez González Leydy Gabriela

Ingeniera Ambiental

Universidad de Santander

Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agropecuarias

Programa de Microbiología Industrial

Bucaramanga

2021

Universidad de Santander UDES Personería Jur. 810 de 12/03/96 Min.Educación VIGILADA MINEDUCACIÓN	MICROBIOLOGÍA INDUSTRIAL COMITÉ DE TRABAJO DE GRADO	
	ACTAS SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO ***MIIFT001BUC***	Versión: 00

No. de Acta: 0042021B **Fecha: 15 de diciembre de 2021**
Lugar: Aula Virtual Teams **Hora Inicio: 16:10** **Hora Final: 17:20**

Cumpliendo con el acuerdo 010 de 2014 emanado por el Consejo Académico, se llevo a cabo la evaluación del trabajo de grado titulado "Evaluación de la capacidad depuradora de un biofiltro tipo airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite, utilizando los cuescos de palma." desarrollado en la modalidad de investigación por la estudiante:

Código	Primer apellido	Segundo Apellido	Nombre(s)
01150332017	Gelves	Gamboa	María Camila

Este trabajo estuvo dirigido por el M. Sc Christian Andrei Chacín Zambrano; codirigido por la Ing. Gabriela Rodríguez González del SENA-Tecnoparque.

Y cumpliendo lo dispuesto por el acuerdo 031 de 2014 por el cual se modifica el Reglamento Académico y Estudiantil, capítulo 5, artículos 80 y 85, parágrafo 1; el jurado evaluador estuvo conformado por la M. Sc Franci Nathalie Gómez Jaimes y el M. Sc Bayron Enrique Agualimpia Valderrama, el trabajo de grado en mención recibe el concepto de Aprobado con una calificación de tres coma nueve (3,9).
En constancia firman:

Christian Andrei Chacín Zambrano
Director de Trabajo de Grado

Franci Nathalie Gómez Jaimes
Evaluador

Gabriela Rodríguez González
Co-directora

Bayron Enrique Agualimpia Valderrama
Evaluador

Andrea Juliana Mantilla Paredes
Directora
Programa de Microbiología Industrial

COPIA NO CONTROLADA

Transcriptor: Carlos Acevedo Isidro
Profesor de Trabajo de Grado

Agradecimientos

En primera instancia agradezco a Dios porque sin él no hubiera podido culminar esta etapa de mi vida. A mi madre, padre y hermano, por ser parte fundamental de todo mi proceso, por brindarme motivación y ser mi apoyo incondicional durante todo este tiempo. A Andrés Felipe, por acompañarme en cada escalón y ser mi compañero de vida.

Quiero agradecer a Indupalma Ltda., quien proporcionó las muestras para el desarrollo de este proyecto.

A mi director, el profesor Christian Chacin MSc, quien aportó los conocimientos necesarios para desarrollar con éxito mi trabajo de grado.

Al Ingeniero Juan Pablo Domínguez Gestor de la línea de Ingeniería y Diseño de Tecnoparque SENA Nodo Bucaramanga quien fue parte fundamental del proceso del diseño y construcción del prototipo.

Al programa de Microbiología Industrial y de Ingeniería Ambiental UDES, por los recursos brindados.

A Tecnoparque SENA Nodo Bucaramanga por brindar las herramientas para la realización de este proyecto.

A la Universidad de Santander Campus Bucaramanga por brindarme educación de calidad.

Dedicatoria

Dedico con todo mi corazón este proyecto a mi madre, quien me enseñó a hacer las cosas con amor y dedicación sin esperar nada a cambio, ella fue mi motivación principal; por su paciencia y amor incondicional he logrado superar dificultades a lo largo de esta etapa tan importante de mi vida. A mi familia y amigos quienes vieron mi evolución durante este proceso, y me motivaron a continuar a pesar de las adversidades.

Tabla de Contenido

pág.

Introducción 17

1. Planteamiento del Problema 19

2. Pregunta de Investigación 22

3. Justificación 23

4. Marco Teórico 25

4.1 Palma Africana (*Elaeis guineensis*) 25

4.1.1 Características de la Palma Africana 25

4.1.2 Proceso Productivo del Aceite de Palma 27

4.2 Residuos de la Palma 28

4.2.1 Cuesco de la Palma 29

4.3 Aguas Residuales 30

4.3.1 Aguas Residuales Industriales 30

4.3.1.1 Características de las Aguas Residuales de Industrias de Aceite de Palma Africana..31

4.3.2 Microorganismos Involucrados en los Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales32

4.4 Laguna de Oxidación 33

4.5 Biofiltro Airlift 33

4.6 Tiempo de Retención Hidráulico 34

4.7 Biopelícula 34

4.8 Parámetros Utilizados para Caracterizar las Aguas Residuales Industriales 35

5. Hipótesis 38

6. Objetivos 39

6.1 Objetivo General 39

6.2 Objetivos Específicos 39

7. Metodología 40

7.1 Diseño del Estudio 40

7.2 Localización de la Investigación 40

7.3 Etapa I. Establecimiento de la Biopelícula en la Matriz de Cuescos para el Proceso de Depuración 40

7.3.1 Muestra de Agua 40

7.3.2 Matriz 40

7.3.3 Inoculación y Formación de la Biopelícula 41

7.3.4 Pruebas de Evaluación de Formación de Biopelícula 41

7.4 Etapa II. Construcción del Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite, Utilizando los Cuescos de Palma de Indupalma Ltda. 42

7.5 Etapa III. Pruebas de Eficiencia del Sistema Biológico de Depuración Sobre Muestras de Aguas Utilizadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite 43

7.5.1 Tiempos de Retención Hidráulicos (TRH) 43

7.5.2 Parámetros Físicos – Químicos 43

7.6 Análisis Estadístico 44

8. Resultados y Discusión 45

8.1 Etapa I. Establecimiento de la Biopelícula en la Matriz de Cuescos para el Proceso de Depuración 45

8.2 Etapa II. Construcción del Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite, Utilizando los Cuescos de Palma de Indupalma Ltda 46

8.3 Etapa III. Pruebas de Eficiencia del Sistema Biológico de Depuración sobre Muestras de Aguas Utilizadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite..... 48

8.3.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO) 48

8.3.2 Sulfatos ($SO4^{2-}$) 51

8.3.3 Nitratos 53

8.3.4 Sólidos Suspendidos Totales 57

9. Conclusiones 61

10. Recomendaciones 62

Referencias Bibliográficas 63

Apéndices..... 70

Lista de Tablas

pág.

Tabla 1 Principales Componentes del Cuesco, la Tusa y la Fibra 30

Tabla 2 Componente de un POME Típico..... 31

Tabla 3 Microorganismos Involucrados en el Tratamiento de Aguas Residuales..... 32

Tabla 4 Características de las Biopelículas..... 35

Tabla 5 Valores Límites Máximos Permisibles de Parámetros Físico-Químicos para la Extracción de Aceites Vegetales Según la Resolución 631 del 2015..... 60

Lista de Figuras

pág.

Figura 1 Raíces de la Palma Africana (Elaeis guineensis). 26

Figura 2 Partes del Fruto de la Palma Africana 27

Figura 3 Muestra de Cuescos de Palma Utilizada como Matriz en el Filtro tipo Airlift 41

Figura 4 Características Morfológicas de los Microorganismos Presentes en la Biopelícula Después de 3 días 46

Figura 5 Moldes de Madera y Amarres Plásticos Utilizados para Moldear de Forma Cilíndrica el Filtro 47

Figura 6 Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite 48

Figura 7 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación de la DQO en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 49

Figura 8 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación de la DQO en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 49

Figura 9 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con y sin Aireación de la DQO en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 50

Figura 10 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación los Sulfatos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 51

Figura 11 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación los Sulfatos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 52

Figura 12 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con y sin Aireación de los Sulfatos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 53

Figura 13 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación de los Nitratos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 54

Figura 14 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación de los Nitratos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 55

Figura 15 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con y sin Aireación de los Nitratos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos..... 56

Figura 16 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación de los Sólidos Suspendidos Totales en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 57

Figura 17 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación de los Sólidos Suspendidos Totales en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos 58

Figura 18 Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación y sin Aireación de los Sólidos Suspendidos Totales en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos..... 59

Lista de Apéndices

pág.

Apéndice A. Diseño del Prototipo 70

Apéndice B. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) 72

Apéndice C. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de Sulfatos (SO_4^{2}-). 74

Apéndice D. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de Nitratos 76

Apéndice E. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de Sólidos Suspendidos Totales 77

Resumen

Título

Evaluación de la Capacidad de Depuración Biológica de un Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite Empleando un Soporte a Partir de Cuesco de Palma a Escala de laboratorio.

Autora

Gelves Gamboa María Camila

Palabras Clave

Depuración biológica, cuesco, palma, aguas residuales, filtro airlift.

Descripción

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es el cultivo de mayor crecimiento en Colombia ya que abastece la mayor parte del mercado nacional de aceites y grasas. Sin embargo, la extracción de aceite de palma produce grandes cantidades de residuos, entre estos se encuentra el cuesco, que se encarga de proteger a la almendra, y, los efluentes resultantes del proceso, los cuales poseen altas cantidades de grasas y aceites. Es por esto, que la utilización de los residuos agroindustriales es una buena alternativa para la generación de otros productos de mayor valor agregado o aplicación a procesos que disminuyen el impacto ambiental que genera la disposición y manejo de estos.

En este trabajo de grado se evaluó la capacidad de depuración biológica de un filtro tipo airlift a escala de laboratorio sobre aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma de una empresa palmera. a partir de una matriz no convencional de cuescos de palma. Para esto, inicialmente se estableció la formación de la biopelícula en la matriz de cuescos de palma con los microorganismos contenidos en la muestra de agua residual de las lagunas de oxidación de la

empresa. Posteriormente, se construyó un filtro tipo airlift a escala de laboratorio y se puso en funcionamiento en diferentes tiempos de retención hidráulicos (TRH) con aireación y sin aireación, donde se evaluaron parámetros físico - químicos como la DQO, SST, nitratos y sulfatos para determinar la eficiencia del proceso.

Se evidenció que el TRH de 12 horas con aplicación de aire, presentó mejores resultados en cuanto a las características físico – químicas de la calidad de las aguas usadas en la extracción de aceite de palma. Los resultados de la investigación permitieron contribuir a la generación de nuevo conocimiento sobre el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Abstract

Title

Evaluation of the Biological Purification Capacity of an Airlift type Filter for the Treatment of Used Water During the oil Extraction Process Using a Support from Palm Kernel on a Laboratory Scale.

Author

Gelves Gamboa María Camila

Keywords

Biological purification, pit, palm, sewage, airlift filter.

Description

The African palm (*Elaeis guineensis*) is the fastest growing crop in Colombia since it supplies most of the national market for oils and fats. However, the extraction of palm oil produces large amounts of waste, among which is the shell, which is responsible for protecting the almond, and the effluents resulting from the process, which have high amounts of fats and oils. This is why the use of agro-industrial waste is a good alternative for the generation of other products with greater added value or application to processes that reduce the environmental impact generated by their disposal and management.

In this degree work, the biological purification capacity of a laboratory-scale airlift type filter on wastewater from the palm oil extraction process of a palm company was evaluated. from an unconventional matrix of palm kernels. For this, the formation of the biofilm was initially established in the matrix of palm shells with the microorganisms contained in the sample of wastewater from the company's oxidation ponds. Subsequently, a laboratory-scale airlift type filter was built and put into operation at different hydraulic retention times (HRT) with aeration

and without aeration, where physical-chemical parameters such as COD, TSS, nitrates and sulfates were evaluated to determine the efficiency of the process.

It was evidenced that the 12-hour HRT with air application presented better results in terms of the physical-chemical characteristics of the quality of the water used in the extraction of palm oil. The results of the research made it possible to contribute to the generation of new knowledge on the use of agro-industrial waste.

Introducción

La palma de aceite (*Elaeis guineensis*) es el cultivo tropical de mayor crecimiento en Colombia, ya que abastece la mayor parte del mercado nacional de aceites y grasas, y ha mantenido una presencia importante dentro de la exportación. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá, Colombia, 2005).

Colombia es uno de los países con más tierras aptas para la siembra de palma, al contar con 3.5 millones de hectáreas sin alguna restricción para la plantación de este cultivo. El 36% de estas hectáreas, se encuentra en siete departamentos de la costa Caribe, donde se cuenta con una infraestructura de puertos marítimos para el comercio exterior (Cuao, 2009).

La extracción de aceite de palma genera gran cantidad de residuos, se dice que, por cada tonelada de aceite, se obtiene una tonelada de residuos de la planta de beneficio. Esto significa que, en el mundo, fácilmente podrían obtenerse 55 millones de toneladas de residuos (Elbersen, 2013). Durante el proceso de extracción de aceite se genera un 20% aceite crudo, 4% de torta de Palmiste, 25% raquis. 7% fibra, 10% de cuesco, 3% y 5% de otros efluentes. (García, J., Cárdenas, M. & Yáñez, E. 2010)

Los cuescos, se encargan de proteger la almendra, estos residuos tienen un impacto ambiental importante, en general, el manejo que se les da a los residuos del proceso de extracción actualmente se orienta a la producción de biogás, compostaje y producción de bioabono (García, 1996). Pero en algunos casos, se desarrollan apilamientos de estos residuos que ha conllevado a generar problemas de plagas y enfermedades a los cultivos, por lo que se tiene que encontrar alternativas de aprovechamiento del material para evitar contaminación durante estas actividades.

Por otra parte, la contaminación de aguas usadas en el proceso de extracción de aceite provoca un desequilibrio ecológico, debido a la gran cantidad de materia orgánica, sólidos y aceites que son generados y que en ocasiones no es eficiente el proceso de tratamiento que se realiza antes de reincorporarlas al afluente. Para una planta extractora en buen funcionamiento, se calcula que 2.5 toneladas de efluentes son generadas por tonelada de aceite de palma crudo producido. (Ah Ngan Ma, 2000)

El aprovechamiento de los residuos agroindustriales es una buena alternativa para la generación de otros productos de mayor valor agregado o aplicación a procesos que disminuyen el impacto ambiental que genera la disposición y manejo de estos (Álvarez, 2017). Es por esto, que el objetivo de este proyecto fue evaluar la capacidad depuradora de un filtro tipo airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite, utilizando los cuescos de palma de Indupalma LTDA.

Este proyecto estuvo apoyado por Tecnoparque SENA nodo Bucaramanga, e Indupalma Ltda., en convenio con el programa de Microbiología Industrial de la Universidad de Santander UDES, con el fin de brindar una alternativa para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales.

1. Planteamiento del Problema

Toda actividad económica realizada por las empresas genera daños y perturbaciones en el ambiente. Anteriormente muy pocas empresas medían el impacto ambiental que generaba su actividad comercial, no se pensaba en el desarrollo de alternativas que minimizaran los daños ambientales, se utilizaba al ambiente en búsqueda de la optimización de los beneficios. En los últimos años, esto ha cambiado, las empresas gracias a la presión de los gobiernos y de la opinión pública de los grupos ambientalistas; están tomando conciencia de su responsabilidad ambiental con el fin de mejorar su imagen corporativa y encontrar un beneficio económico en los residuos resultantes del proceso (Reinosa, D. 2009).

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una planta tropical perenne y monocotiledónea, esto significa que su semilla tiene sólo un cotiledón o almendra. Esta planta es propia de climas cálidos y crece en tierras por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar. Este cultivo tarda entre 3 y 4 años para empezar a producir frutos y su vida productiva puede durar más de 50 años, sin embargo, alrededor de los 25 años se dificulta su cosecha por la altura del tallo. *Elaeis guineensis* se encuentra dentro de los cultivos de semillas oleaginosas que produce mayor cantidad de aceite por hectárea, es por esto, que se siembra comercialmente para obtener aceites (Barrios, B., Castro, Y., & Daza, H., 2018)

Los cultivos de Palma africana en Colombia están ubicados en 25 departamentos, con un área sembrada de 516.960 hectáreas, que produce más de 7.5 millones de toneladas de fruto de palma y genera 1.627.584 de toneladas de aceite de palma (Ortiz, 2019). Además del aceite de palma crudo y palmiste, las plantas extractoras de aceite también generan grandes cantidades de subproductos sólidos y líquidos: racimos vacíos, fibra y cáscara y el efluente de la planta extractora (Ah Ngan Ma, 2000).

El cuesco de palma es uno de los residuos de la extracción de aceite encargado de proteger la almendra, se caracteriza por ser un material vegetal de tipo lignocelulósico duro con estructura porosa, rodeado y atravesado por fibras (Álvarez & Lindsay, 2017). Este material constituye entre 5 y 7 % del peso total del racimo de fruta fresca (RFF) (Flórez et al., 2016). En la actualidad, la práctica más frecuente es quemarlo como combustible en las calderas de vapor. En general, se ha prestado poca atención a su valor agregado (Van Dam, 2016).

Hoy en día, la disposición final del cuesco de palma genera problemas en el sector de la agroindustria en Colombia, pues el uso que se le da a este residuo no es totalmente eficiente, ya que en la combustión en calderas presenta el inconveniente de que su ceniza obstruye tuberías y ductos debido al alto contenido de sodio y potasio en forma de óxidos que contiene. (Abnisa, F., Arami, A., Wan, W. *et al.*, 2013). Por otra parte, Según el estudio realizado por Leon, D. (2019) donde se evaluaron los aspectos ambientales en las plantas extractoras de aceite de palma aceitera, se determinó que la caldera es la fuente fija que genera mayor impacto ambiental, las emisiones originadas por la combustión de la biomasa arrastran al aire concentraciones altas de los gases de efecto invernadero, como son el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO2), hidrocarburos inquemados (HC), como también óxidos de nitrógeno (NO2), óxidos de azufre (SO2).

Asimismo, las plantas de beneficio de aceite de palma producen grandes cantidades de aguas residuales en las etapas de recepción, esterilización, desfrutado, prensado y clarificación (Malacatus-Cobos et al., 2017). En promedio una planta típica produce aproximadamente 0,8 m^3 de efluente por cada tonelada procesada de racimos de fruta fresca (Althausen, 2017). Es necesario un tratamiento antes de reincorporar estas aguas residuales al afluente ya que estas

contienen una alta concentración de compuestos fenólicos y una alta demanda química de oxígeno (DQO), los cuales causan el agotamiento del recurso hídrico.

Considerando que, el crecimiento industrial conlleva al aumento en generación de residuos los cuales se han convertido en una problemática tanto ambiental como económica para las diferentes empresas ya que éstas deben asumir los altos costos que genera su disposición final (Malacatus-Cobos et al., 2017). El aprovechamiento de residuos agroindustriales es una gran alternativa para sobrellevar esta problemática.

2. Pregunta de Investigación

¿El filtro tipo airlift presenta una capacidad de depuración de aguas empleadas para la extracción de aceite de palma?

3. Justificación

Actualmente las agroindustrias no solo son evaluadas por su desempeño productivo y económico, sino también por su sostenibilidad, de manera que la protección de este ya no solo es una exigencia, sino que representa amenazas, oportunidades y hasta condiciona su permanencia o salida del mercado, de manera que la disposición final de los residuos generados por estas industrias es cada vez más importante (Cury R et al., 2017). En los últimos años, las industrias han buscado nuevos procesos de producción que sean más sostenibles, enfocándose en el aprovechamiento de los residuos. Esto contribuye en la disminución de la contaminación y degradación del ecosistema, evitando una disposición final inadecuada. (Motato et al., 2006).

Colombia cuenta con una gran biodiversidad y un importante potencial de biomasas. Las actividades agroindustriales en el país producen más de 70.000.000 toneladas de residuos agrícolas de cosecha e industriales al año, en cultivos de café, plátano, caña, palma de aceite, maíz, banano y arroz (M. R. Millan, 2016). En el país, la producción de aceite crudo de palma se ha incrementado un 60% en los últimos 5 años, este incremento va relacionado con la generación de grandes cantidades de residuos.

La empresa palmera que apoya este proyecto, es una de las cinco empresas certificadas en Colombia en principios y criterios y cadena de custodia para la (RSPO), avalando a la organización en la implementación de buenas prácticas agrícolas, ambientales y sociales, orientadas hacia la producción sostenible de aceite de palma y palmiste (RSPO Roundtable on Sustainable Palm Oil, 2018). Esta empresa produce residuos anuales que generan un impacto ambiental importante, dentro de los que se destacan los cuescos de palma, y los efluentes.

Según Pertuz y Santamaría (2014), Colombia es la primera potencia mundial en biodiversidad relativa, pero también es la campeona en depredación ambiental, debido a ciertos

factores entre los cuales se encuentran algunas actividades agrícolas, es por esto que, uno de los principales retos de la siembra de palma africana (*Elaeis guineensis*) para la extracción de aceite es la sostenibilidad, por esta razón, observando esta necesidad, se desarrolló este trabajo de investigación con el fin de evaluar la capacidad depuradora de un filtro tipo airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite, utilizando una matriz no convencional con cuescos de palma. El filtro permite llevar a cabo la degradación de la muestra de agua post procesada en un ambiente controlado, ya que se evita la influencia de factores externos. Por otra parte, la matriz utilizada es poco convencional debido a que según el Instituto Nacional de Ecología (2021) los materiales filtrantes utilizados en los filtros tipo airlift generalmente son, rocas porosas, tierra de diatomeas, perlita, tierra, trozos de maderas, diferentes tipos de compostas, residuos orgánicos tales como cáscaras de cacahuate, de arroz o de coco, fibra de caña de azúcar, entre otros.

4. Marco Teórico

4.1 Palma Africana (*Elaeis guineensis*)

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una planta monocotiledónea originaria de África occidental y su origen botánico se encuentra situado en el golfo de Guinea.

Los cultivos de palma necesitan para su obtención un proceso de aproximadamente 14 meses, los cuales, comprenden desde la germinación de la semilla hasta el desarrollo de la planta en vivero. Las plantaciones comienzan a producir frutos a los 5 años de implantadas y alcanzan su mayor producción entre los 20 y 25 años; aunque es importante resaltar, que estas plantas tienen una vida económica de 22 años ya que a esta edad, la altura de la palma genera dificultades para su cosecha (Carrere, 2006).

En Colombia, los cultivos de palma africana se encuentran ubicados en 54 municipios, clasificados en cuatro zonas así: Zona norte: Los departamentos del Magdalena, Norte del Cesar, Atlántico y La Guajira. Zona central: Los departamentos de Santander, Norte de Santander, sur del Cesar y Bolívar. Zona oriental: Los departamentos de Meta, Cundinamarca, Casanare y Caquetá, finalmente la Zona occidental: El departamento de Nariño (Buzón, 2010).

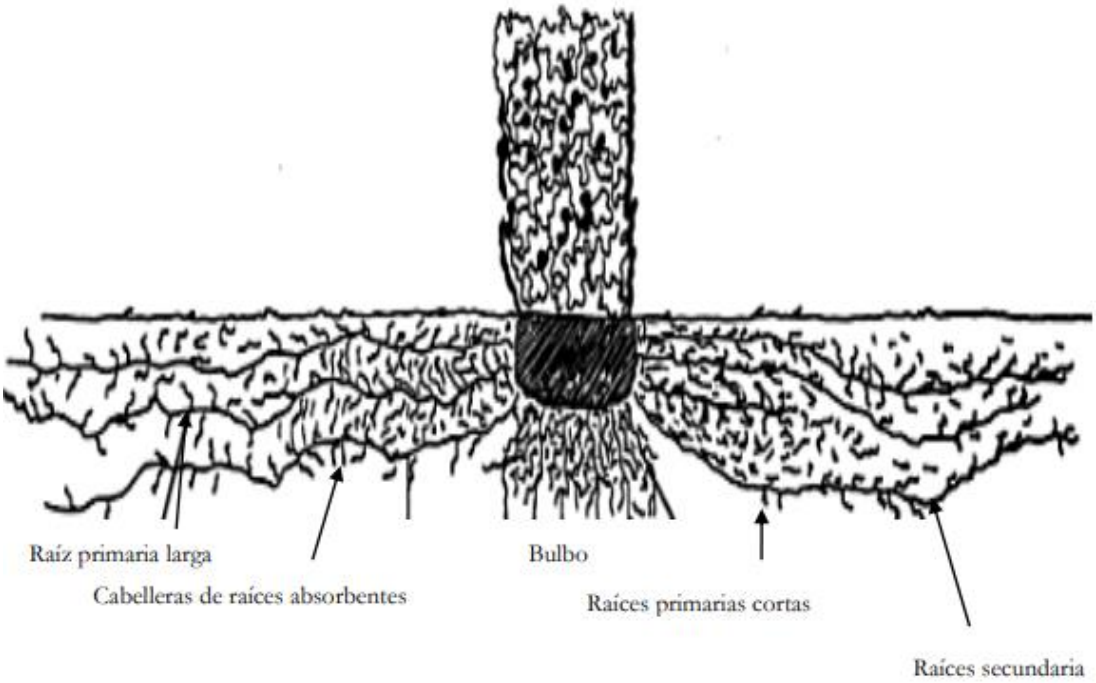
Actualmente el aceite crudo de palma se produce para la realización de productos comestibles, productos industriales y combustible (Carrere, 2006).

4.1.1 Características de la Palma Africana

Raíces: *Elaeis guineensis* posee raíces primarias, secundarias y terciarias que se originan del bulbo radical, las cuales se encuentran en los primeros 50 cm del suelo (Pérez, 2015) (figura 1).

Figura 1

Raíces de la Palma Africana (Elaeis guineensis).



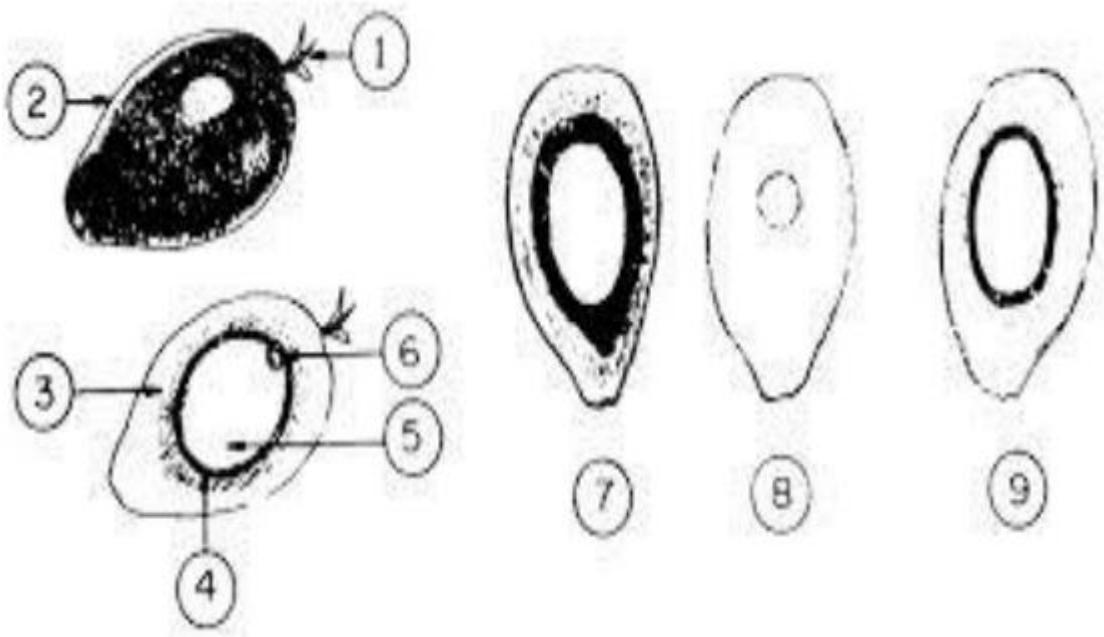
Nota. Adaptado de Pérez, A. Caracterización de aguas residuales de la industria aceitera chiapaneca y sus efectos al suelo. 2015.

Hojas: Las hojas miden de 5 a 7 m, con 200 a 300 folíolos en dos planos diferentes. El pecíolo es de 1,5 m de largo y se ensancha en la base. La cara superior es plana y la inferior redondeada. Sus bordes son espinosos, con fibras. Cabe resaltar, que las hojas permanecen adheridas al tronco por 12 años o más (Mujica, 2019).

Fruto: Según Torres (2006), El fruto es una drupa sésil, ovoide, que presenta color oscuro o negro cuando está inmaduro y color predominantemente rojo en su madurez (figura 2). Existen variaciones en el color y forma del fruto que son genéticamente controladas. Por otra parte, es importante destacar que la cantidad de aceite producido por una palma aceitera depende de dos factores, la composición del racimo y la calidad del fruto.

Figura 2

Partes del Fruto de la Palma Africana



Nota. 1: Estigma 2: Exocarpo 3: Mesocarpo o pulpa 4: Endocarpo o cuesco 5: Endospermo o almendra 6: Embrión 7: Dura 8: Pisífera 9: Ténera. Adaptado de Pérez, A. Caracterización de aguas residuales de la industria aceitera chiapaneca y sus efectos al suelo. 2015.

Tronco o estípite: Un solo punto terminal de crecimiento, cubierto con las bases de las hojas de los años anteriores. El diámetro es normalmente de 45-68 cm, la circunferencia es más o menos de 355 cm, pero la base comienza más gruesa (Technoserve, 2009).

Racimo: Este posee un tamaño aproximado de 35 cm de ancho por 50 cm de largo, su peso puede variar de 2 a 3 kg en palmas jóvenes y alcanzar hasta 100 kg por racimo en adultas (Pérez, 2015).

4.1.2 Proceso Productivo del Aceite de Palma

Según Acuña, A. (2000) el proceso productivo del aceite de palma inicia desde la recopilación y transporte del fruto de palma. Al llegar a la planta, se realiza el proceso descrito a continuación:

1. Recepción del fruto: Se realiza el pesaje en camiones con y sin fruto para lograr obtener el peso neto, evaluando la calidad del fruto y seleccionarlo.

2. Esterilización: Este proceso se lleva a cabo sometiendo los racimos de fruto de palma a la acción de vapor de agua en autoclaves cilíndricos horizontales, donde los factores importantes son la temperatura y el tiempo de cocción, teniendo en cuenta el tamaño de los racimos y el grado de madurez de los mismos. Cabe resaltar, que durante este proceso, se genera la mayor cantidad de efluentes.

3. Desfrutado: Mediante un tambor rotatorio, se procede a separar el fruto del racimo. El fruto es enviado al digestor por medio de un elevador y el racimo vacío es utilizado como abono orgánico.

4. Extracción: El objetivo principal de esta etapa es romper, mediante calor y presión mecánica, las celdas que contienen el aceite del mesocarpio.

5. Clarificación: El aceite obtenido es filtrado, decantado y centrifugado, con el fin de retirar agua e impurezas lodosas del aceite para alcanzar un alto rendimiento de aceite con un mínimo de impurezas sólidas.

6. Almacenamiento: El aceite es enviado a los tanques de almacenamiento para su posterior despacho.

Es preciso mencionar, que las etapas del proceso donde se generan aguas residuales son: Esterilización, desfrutado y clarificación.

4.2 Residuos de la Palma

La agroindustria integra la producción primaria agrícola, pecuaria o forestal mediante un proceso de beneficio o transformación. Sin embargo, este tipo de industrias generan residuos que pueden o no tener un valor comercial. Es de gran importancia realizar una caracterización para

conocer la composición de estos residuos agroindustriales y lograr buscar una oportunidad de aprovechamiento. Cabe resaltar, que se debe tener una conciencia ambiental para el manejo y destino final de estos (Saval, 2012).

Es necesario destacar que, según datos del Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, en el 2013 la producción de Racimos de Fruto Fresco (RFF) fue cercana a 6,2 millones de toneladas, de las cuales, el 40,1% corresponde a biomasa sólida residual. Este porcentaje se divide en tres principales residuos: 20% de tusa, 14% de fibra de mesocarpio y 6% de cuesco; el restante corresponde a cenizas, residuos de tolva y lodos (Talero et al., 2017).

4.2.1 Cuesco de la Palma

El cuesco o semilla de palma es una de las partes del fruto de la palma africana encargado de proteger la almendra, se caracteriza por ser un material vegetal de tipo lignítico, duro, con estructura porosa, rodeado y atravesado por fibras. Este material es un residuo generado en el proceso de extracción de aceite de palma africana, se obtiene luego de la recuperación de la almendra mediante procesos de calentamiento en hornos debido a su alta resistencia (Álvarez, 2017).

Según la guía ambiental de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia, el área cultivada llega a las 365.000 hectáreas. Por lo tanto, durante el proceso de tratamiento para la extracción del aceite se generan grandes volúmenes de residuos de cuesco de palma, cerca de 300.000 toneladas anuales para finales del año 2010. (Fedepalma, 2011). Dentro de los componentes principales del cuesco se encuentra la lignina, celulosa, hemicelulosa, entre otros. (Tabla 1)

Tabla 1

Principales Componentes del Cuesco, la Tusa y la Fibra

Componentes	Biomasa		
	Cuesco	Tusa	Fibra
Lignina (%)	49,58	10,23	21,79
Celulosa (%)	30,28	44,97	33,21
Hemicelulosa (%)	12,72	19,92	16,58
Extractivos (%)	7,13	19,32	19,34
*PCS (KJ/Kg)	21,445	8,165	19,201

Nota: Adaptado de García Núñez, J., Cárdenas, M. y Yáñez, E. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Palmas, 31,* p. 41-48. 2010.

4.3 Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas que contienen impurezas provocadas de forma directa o indirecta por la actividad humana, procedentes del desagüe de viviendas, comercios, establecimientos industriales, agrícolas, entre otros; que contienen alta cantidad de sustancias y carga microbiológica. La composición de estas aguas se establece mediante mediciones físicas, químicas y microbiológicas. Cabe resaltar, que existen diferentes tipos de aguas residuales según su tipo: Aguas residuales urbanas, aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales (M. Pérez, 2006).

4.3.1 Aguas Residuales Industriales

Las aguas residuales industriales están compuestas por los desechos líquidos de diferentes fábricas o empresas que producen cualquier artículo o material sometido a oferta y demanda en el mercado. Estas pueden tener diferentes impactos ambientales desde el momento de su generación, hasta su disposición final. Cuando estas aguas residuales son descargadas sin tratamiento a los cuerpos hídricos, afectan el equilibrio biológico, especialmente si contienen detergentes, aceites, sustancias tóxicas, cancerígenas y/o mutagénicas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia, 2000).

4.3.1.1 Características de las Aguas Residuales de Industrias de Aceite de Palma Africana. Las aguas residuales de plantas de beneficio de aceite de palma o Palm Oil Mill Effluent (POME, por sus siglas en inglés), son un factor de impacto ambiental importante. Se producen principalmente en los procesos de esterilización de la fruta y en la clarificación del aceite. En promedio, una planta produce aproximadamente 0,8 m^3 de (POME) por cada tonelada procesada de racimos de fruta fresca, esto quiere decir que, una planta extractora mediana con 150.000 toneladas de racimos de fruta fresca, produce aproximadamente 120.000 m3 al año (Althausen, 2016).

Según Santosa (2008) la apariencia física del POME es la de un fluido espeso, coloidal y viscoso, con altos contenidos de sólidos totales (4 – 5%) y volátiles (2 – 4%), así como grasas (0,6 – 0,7%), que se descarga a temperaturas de 50 a 90 °C. Así mismo, el POME contiene una cantidad importante de aminoácidos y otros compuestos nitrogenados, nutrientes inorgánicos (Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn, Cu, Co y Cd), fibras cortas, ácidos orgánicos libres y carbohidratos, estos últimos de la ruptura de las celulosas y hemicelulosas en la extracción al vapor. En la tabla 2 se observan los componentes principales del POME.

Tabla 2

Componente de un POME Típico

Parámetro	Cantidad	Parámetro	Cantidad
pH	4,7	Fósforo	18 mg/L
Aceite y grasas	50.000 mg/L	Potasio	2.270 mg/L
Demanda Bioquímica	25.000 mg/L	Magnesio	615 mg/L
Sólidos totales	40.500 mg/L	Calcio	439 mg/L
Sólidos suspendidos	18.000 mg/L	Boro	7,6 mg/L
Sólidos volátiles totales	34.000 mg/L	Hierro	46,5 mg/L
Nitrógeno amoniacal	35 mg/L	Manganeso	2 mg/L
Nitrógeno total	750 mg/L	Cobre	0,89 mg/L
		Zinc	2,3 mg/L

Nota: Adaptado de Ibáñez, E. Estudio de la generación y composición de biogás en tratamiento de efluentes con biodigestores carpados en la industria de extracción de aceite de palma mediante simulación. Universidad Autónoma de Bucaramanga. 2019.

Teniendo en cuenta la perspectiva de la normativa de vertimiento, los parámetros más importantes tenidos en cuenta en la disposición final del POME son: la Demanda Química de Oxigeno (DQO), la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos. En Colombia, la resolución 631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales (Ibáñez, 2019).

4.3.2 Microorganismos Involucrados en los Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales

Los tratamientos biológicos de aguas residuales se basan en el empleo de microorganismos, para la depuración de las mismas. Estos tratamientos tienen mayores rendimientos y menores costos económicos de explotación y mantenimiento. Es necesario destacar, que durante los últimos años se ha llevado a cabo el tratamiento de aguas residuales industriales por medio de hongos, como es el caso de las aguas residuales provenientes de la industria del almidón, lácteos, farmacéutica, textil, de la manufactura del aceite, aguas residuales acidogénicas, resultantes dsinge la destilación de etanol, etc. (Singh, 2006). En la tabla 3 se evidencian las características principales de los microorganismos que intervienen en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 3

Microorganismos Involucrados en el Tratamiento de Aguas Residuales

Microorganismo	Descripción
Bacterias	Organismos procariontes unicelulares, que emplean la materia orgánica soluble como fuente de energía. Según Arnaiz, C., Isac, L., Lebrato, J. (2000) las bacterias más empleadas en el tratamiento de aguas residuales son las del género *Propionobacterium, Bacteroides, Micrococcus, Clostridium.*
Protozoarios	Organismos eucariontes unicelulares, sin pared celular. En su mayoría son aerobios quimioheterótrofos. Los protozoarios por lo general son de mayor tamaño que las bacterias y con frecuencia las utilizan como fuente de energía. Por lo tanto, son útiles en la obtención de un efluente más puro, debido a que se alimentan de bacterias unicelulares y materia orgánica particulada.

Tabla 3 (Continuación)

Microorganismo	Descripción
Hongos	Microorganismos eucariontes, multicelulares, quimioheterótorfos y no fotosintéticos. Requieren de una menor cantidad de nitrógeno y pueden crecer a valores de pH bajos. Los géneros más representativos son *Aspergillus*, *Rhizopus*, y *Cunninghamella*.
Microalgas	Las microalgas son microorganismos fotosintéticos y unicelulares. La habilidad de las microalgas para producir oxígeno proporciona parte del requerido por las bacterias en la estabilización de la materia orgánica. Los cuatro grupos más importantes son las algas verdes (*Chlorophyceae*), diatomeas (*Bacillariophyceae*), algas verde-azules (*Cyanophyceae*) y algas doradas (*Chrysophyceae*).
Rotíferos	Los rotíferos son eucariontes y heterótrofos. Son bastante efectivos en el consumo de bacterias y microalgas dispersas y floculadas y de pequeñas partículas de materiales orgánicos.

Nota: Adaptado de Ibáñez, E. Estudio de la generación y composición de biogás en tratamiento de efluentes con biodigestores carpados en la industria de extracción de aceite de palma mediante simulación. Universidad Autónoma de Bucaramanga. 2019.

4.4 Laguna de Oxidación

Según Martínez & Guzmán (2003) una laguna de oxidación es una estructura simple para embalsar agua, la cual tiene una profundidad de 1 a 4 m, con periodos de retención de uno a cuarenta días, y tienen como propósito conseguir que las aguas acumuladas en ellas lleguen a cumplir un conjunto de parámetros cuantitativos fijados generalmente por normativas, que permitan su descarga al ambiente receptor sin ocasionar problemas ambientales e inclusive ser utilizadas para riego de cultivos. Estas aguas residuales, al encontrarse en las lagunas de oxidación, pasan por un proceso de autodepuración, en el que ocurren fenómenos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos. Es necesario resaltar que dentro de los parámetros utilizados para evaluar la eficiencia de las lagunas de oxidación se encuentran: La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el número más probable de coliformes fecales.

4.5 Biofiltro Airlift

Según Chisti (1989) un biofiltro airlift (BAL) es un equipo agitado neumáticamente que se caracteriza por que el suministro de energía para mantener homogeneidad en su interior tiene lugar mediante la expansión isotérmica de la fase gaseosa introducida. En bioprocesos, la ventaja

principal de estos biofiltros es que producen un menor daño celular, aceptan mayores tasas de aireación y menores costos energéticos. Además, estos equipos ofrecen la posibilidad de una fluidización de sólidos simple y de alta eficiencia. La energía suministrada para agitación y mezclado se realiza por expansión del gas inyectado, por lo tanto, se evitan cambios morfológicos y metabólicos en las células de cultivo. Cabe resaltar, que las ventajas principales de los biofiltros airlift con respecto a las columnas de burbujas, son: mayores capacidades de transferencia de masa, mayores velocidades superficiales de líquido y gas, y los patrones de flujo bien definidos que se obtienen en ello (Chisti & Jauregui-Haza, 2002).

4.6 Tiempo de Retención Hidráulico

Según Romero, R. (2006) el tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo medio que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil. El TRH es un parámetro fundamental en el diseño de biorreactores, ya que tiene influencia directa en la eficiencia del tratamiento.

4.7 Biopelícula

El término biopelícula hace referencia a organizaciones microbianas compuestas por microorganismos que se adhieren a las superficies gracias a la secreción de un exopolímero. El exopolímero, forma una matriz adherente en donde estos quedan atrapados y comienzan a organizarse en colonias con diferentes requerimientos metabólicos (Betancourth, M., et al, 2004). Cabe resaltar, que la estructura química y fisiológica de las biopelículas varía de acuerdo con la naturaleza de las especies que la conforman y del medio ambiente donde se encuentra (González–Brambila & López–Isunza, 2008).

Las biopelículas ofrecen a los microorganismos protección contra agentes dañinos, cambios drásticos en el medio ambiente, y contra los depredadores. Sin embargo los organismos

que la conforman deben competir por el espacio y los nutrientes dentro de la biopelícula (González–Brambila & López–Isunza, 2008). Dentro de las características de las biopelículas (Tabla 4) se encuentra la heterogeneidad, lo que las hace organizaciones únicas que pueden estar conformadas por bacterias, hongos y protozoos. Se ha observado que los microorganismos al ser variados dentro de esta organización presentan diferentes microambientes de pH, tensión de oxígeno, concentración de iones, carbono y nitrógeno, entre otros (González–Brambila & López–Isunza, 2008). Por otra parte, es importante destacar que las biopelículas tienen gran importancia en el tratamiento de aguas residuales debido a que la concentración de biomasa en una biopelícula puede llegar a ser diez veces mayor que la concentración en cultivo líquido (Casey et al., 1999).

Tabla 4

Características de las Biopelículas.

Adherencia
Heterogeneidad
Diferentes microambientes (pH, tensión O_2, concentración de iones, carbono, nitrógeno)
Sistema circulatorio primitivo
Resistente a las defensas del hospedero, agentes microbianos y detergentes
Quorum sensing

Nota: Adaptado de Betancourth, M., Botero, J. E., & Rivera, S. P. Biopelículas: una comunidad microscópica en desarrollo. Colombia Médica, 35 (3 Supl 1), 34-39. 2004.

4.8 Parámetros Utilizados para Caracterizar las Aguas Residuales Industriales

Aceites y grasas: Son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas. Estas natas y espumas entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento de un agua residual. El contenido en aceites y grasas presentes en un agua residual se determina mediante su extracción previa, con un disolvente apropiado y la posterior evaporación del disolvente (Bravo et al., 2016).

Nitrógeno: El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Las formas de interés de aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos y nitratos. Todas son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Este parámetro es necesario para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos (Romero, 2004).

Fósforo: El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. En general, se considera como el principal elemento limitante en el crecimiento de algas. En exceso este genera nocivas e incontroladas proliferaciones de algas y microorganismos en el medio ambiente acuoso. Sin embargo, es un nutriente esencial para el correcto funcionamiento de procesos biológicos de depuración (Villacis, 2011).

Organismos patógenos: El grupo de microorganismos coliformes es considerado un indicador de contaminación en aguas residuales, se encuentran en grandes cantidades en el ambiente (fuentes de agua, vegetación y suelos). Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales son; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwarsiella* y *Citrobacter* (Arcos Pulido et al., 2005).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. Este parámetro es el más utilizado para medir la calidad de las aguas residuales y para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua. Normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO5) y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO2/l) (Romero, 2004).

Demanda química de oxígeno (DQO): La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para descomponer la materia orgánica en condiciones aeróbicas. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO2/l). (Buenaventura, M. & Tamayo, M. 2010)

Oxígeno disuelto: El oxígeno disuelto es la concentración de oxígeno medida en un líquido, por debajo de la saturación. Normalmente se expresa en mg/l. (Buenaventura, M. & Tamayo, M. 2010)

Olor: El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles (Ramalho, 2003).

Turbidez: Según Latorre, A. (2012), la turbidez es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz, impidiendo su transmisión. La medición de la turbidez se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

Sólidos suspendidos (SS): Los sólidos suspendidos se refieren a pequeñas partículas de contaminantes sólidos insolubles que flotan en la superficie o están suspendidos en aguas residuales. Resisten la remoción por medios convencionales. Estas partículas son visibles y flotan en las aguas residuales entre superficie y fondo. Pueden ser removidos por medios físicos o mecánicos a través de procesos de filtración o de sedimentación (Espitia, 2017).

5. Hipótesis

Ho: El filtro no presenta una capacidad de depuración de aguas empleadas para la extracción de aceite de palma.

H1: El filtro presenta una capacidad de depuración de aguas empleadas para la extracción de aceite de palma.

6. Objetivos

6.1 Objetivo General

Evaluar la capacidad depuradora de un filtro tipo airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite, utilizando los cuescos de palma aceitera.

6.2 Objetivos Específicos

- Establecer la formación de la biopelícula en la matriz de cuescos para el proceso de depuración.
- Construir un filtro tipo airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite, utilizando los cuescos de palma aceitera
- Determinar la eficiencia del sistema biológico de depuración sobre muestras de aguas utilizadas durante el proceso de extracción de aceite.

7. Metodología

La evaluación de la capacidad de depuración biológica del filtro tipo airlift sobre muestras de aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma se llevó a cabo en tres etapas, con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados y establecer un orden en las actividades realizadas.

7.1 Diseño del Estudio

Estudio descriptivo tipo experimental.

7.2 Localización de la Investigación

Este proyecto se desarrolló en las instalaciones de la Universidad de Santander – UDES en la ciudad de Bucaramanga, Santander. El filtro tipo airlift fue construido en las instalaciones de Tecnoparque SENA nodo Bucaramanga. Los análisis para determinar la eficiencia del filtro fueron realizados en el Laboratorio de Tejidos Vegetales del programa de Microbiología Industrial y en el Laboratorio de Procesos Unitarios de Ingeniería Ambiental.

7.3 Etapa I. Establecimiento de la Biopelícula en la Matriz de Cuescos para el Proceso de Depuración

7.3.1 Muestra de Agua

Las muestras de agua residual usadas para la evaluación del filtro tipo airlift fueron proporcionadas por una empresa palmera de un de las lagunas de oxidación final del proceso que poseen.

7.3.2 Matriz

Se utilizó una matriz no convencional a partir de cuescos de palma suministrados por dicha empresa, el cual fue fragmentado mecánicamente mediante un molino eléctrico a un tamaño aproximado de 1,0 cm (figura 3).

Figura 3

Muestra de Cuescos de Palma Utilizada como Matriz en el Filtro tipo Airlift

7.3.3 Inoculación y Formación de la Biopelícula

El proceso de inoculación se llevó a cabo con los microorganismos contenidos en la muestra de agua residual de las lagunas de oxidación de la empresa. Para ello, se agregó la muestra de agua residual la cual fue sometida horas antes a sedimentación al filtro con los cuescos de palma y se esperó durante 3 días a que se llevara a cabo la formación de la biopelícula. Transcurrido ese tiempo, el prototipo estaba listo para iniciar su operación.

7.3.4 Pruebas de Evaluación de Formación de Biopelícula

Se realizó un frotis del soporte en el cual, se tomó la muestra de la biopelícula directamente realizando un frotis con un hisopo estéril enjuagado con solución salina estéril para remover las células no adheridas, posteriormente, se transfirió a un Erlenmeyer adicionando 50 mL de solución salina estéril y luego se agitó en shaker durante 20 minutos, todo esto, para incrementar el número de microorganismos presentes en la biopelícula. Finalmente se sembró

por triplicado 100 µl de muestra en medio Plate Count y se incubó para observar microscópicamente microorganismos presentes en la biopelícula

7.4 Etapa II. Construcción del Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite, Utilizando los Cuescos de Palma de Indupalma Ltda.

Para la investigación se desarrolló un filtro tipo airlift a escala de laboratorio con una matriz no convencional de cuescos de palma. El prototipo fue construido de acuerdo con las especificaciones de Cabrales, I., y Chacín, C., (2013); el cual cuenta con un sistema de aireación, un calentador para el control de temperatura, una entrada de aire en la parte inferior, una salida de gas, dos llaves de toma de muestra, un filtro interno con perforaciones para la matriz no convencional de cuescos de palma.

El diseño del prototipo se basó en el cálculo de parámetros tales como diámetro del tanque (Dt) altura de trabajo (Ht), altura de la columna interna o tubo draft (Hd), volumen de trabajo de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Diámetro del tanque: Dt = Dd. 0,33

Altura de trabajo: Ht = Hd. 0,66

Altura de la columna interna (tubo draft): Hd = 0,66. Ht

Volumen de trabajo: $V = \pi . r$ 2

El filtro hace parte de una propuesta apoyada por el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA - Red Tecnoparque, Nodo Bucaramanga, Santander. La propuesta fue presentada a la línea de desarrollo de diseño e ingeniería. Apoyaron en el diseño y construcción del filtro a escala de laboratorio.

7.5 Etapa III. Pruebas de Eficiencia del Sistema Biológico de Depuración Sobre Muestras de Aguas Utilizadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite

7.5.1 Tiempos de Retención Hidráulicos (TRH)

El filtro fue operado en función del tiempo de retención hidráulico. Los tiempos utilizados fueron 0 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas. Se realizaron mediciones por triplicado de los parámetros físico-químicos que definen la calidad del agua al inicio y al final de cada tiempo establecido.

7.5.2 Parámetros Físicos – Químicos

Durante el proceso se tomaron muestras en cada tiempo de retención establecido para realizar análisis de DQO, SST, nitratos y sulfatos como indicadores del proceso de depuración con presencia y ausencia de aireación.

DQO: Se determinó mediante el método de reflujo cerrado y volumetría (IDEAM, 2007). Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de sulfato de plata (Ag2SO4) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercúrico ($HgSO_4$) adicionado para eliminar la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, el $K_2Cr_2O_7$ remanente se tituló con sulfato ferroso amoniacal para determinar la cantidad de $K_2Cr_2O_7$ consumido. La materia orgánica se calculó en términos de oxígeno equivalente.

SST: Se determinó de acuerdo con el método establecido por el IDEAM (2007). Este método gravimétrico se basa en la retención de las partículas sólidas en un filtro de fibra de vidrio a través del cual se hace pasar una muestra homogénea; el residuo que queda retenido se

seca a 103-105°C. El incremento en el peso del filtro representó la cantidad de sólidos suspendidos totales.

Nitratos: Mediante espectrofotometría ultravioleta (UV), esta técnica mide la absorbancia del nitrato (NO_3^{-}) a 220 nm y es adecuada para la determinación rápida de NO_3 – y el monitoreo de aguas. (IDEAM, 2007)

Sulfatos: Por el método nefelométrico establecido por el IDEAM (2007). En este proceso el ion SO_4^{2-} forma una suspensión con cloruro de bario (BaCl2) en presencia de ácido acético para formar cristales de sulfato de bario ($BaSO_4$) de tamaño uniforme. Se mide la dispersión de luz de la suspensión de $BaSO_4$ con un turbidímetro, y la concentración de SO_4^{2-} se determina por comparación de la lectura contra una curva estándar.

Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de eficiencia de remoción de contaminantes aplicando la siguiente fórmula:

$$E = \frac{(S0 - \mathrm{S})}{SO} X100$$

Donde:

E = Eficiencia de remoción de carga contaminante (%)

S = Carga contaminante de salida (mg/L)

S0 = Carga contaminante de entrada (mg/L)

7.6 Análisis Estadístico

Se realizó un diseño factorial 4x3 donde se estableció un análisis de varianza mediante Anova y diferencias significativas por Fisher.

8. Resultados y Discusión

8.1 Etapa I. Establecimiento de la Biopelícula en la Matriz de Cuescos para el Proceso de Depuración

La depuración biológica de las aguas residuales consiste en la eliminación de la contaminación biodegradable por una biocenosis o comunidad de organismos vivos (generalmente microorganismos), que es mantenida en un ambiente técnicamente controlado (reactor biológico).

Las biopelículas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales aprovechan una serie de mecanismos de eliminación, como la degradación biológica, la biosorción, la bioacumulación y la biomineralización (Tejero, J., Esteban, A., Díez, R. *et al*. 2012).

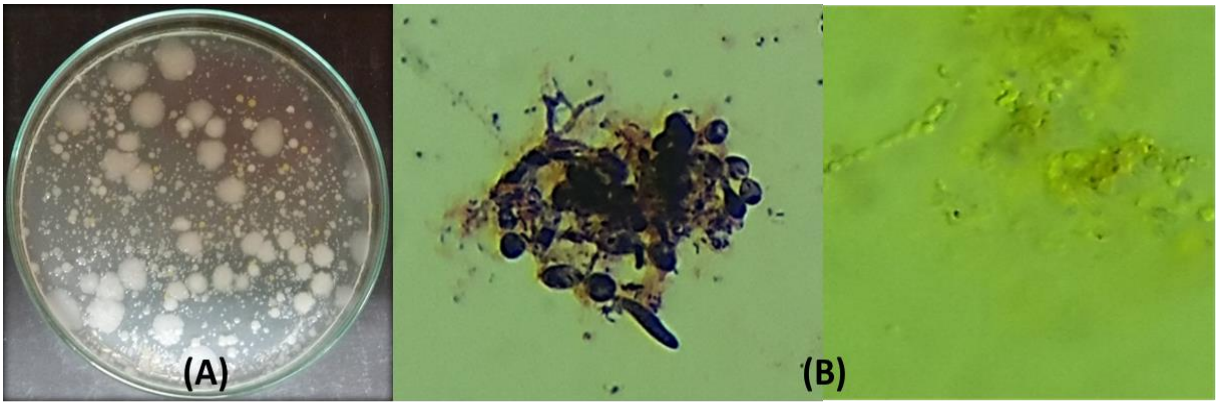
Durante los tres días se llevó a cabo la formación de la biopelícula, donde se evidenciaron microorganismos levaduriformes. (Figura 4). Según Betancourth, M., Botero, J., & Rivera, S. (2004) las biopelículas en están conformadas básicamente por especies de *Pseudomonas*, *Corinebacterias*, micobacterias y algunas levaduras. Sin embargo, para el buen desempeño de la biopelícula se requieren condiciones especiales de oxígeno, temperatura, pH, nutrientes, sin las cuales la biorremediación no se produce.

Por otra parte, según el estudio realizado por Sangucho, W. & Rodríguez, A. (2018) donde se utilizó el Raquis como medio filtrante, se logró determinar que este tipo de residuo es viable debido a que este material facilita la creación de poros microscópicos, en donde se deposita el material suspendido, generando la remoción de contaminantes.

Lo que explica que estos materiales facilitan la formación de las biopelículas.

Figura 4

Características Morfológicas de los Microorganismos Presentes en la Biopelícula Después de 3 días



Nota. (A) Morfología macroscópica en Agar Plate Count. (B) Morfología microscópica observada a 40X. 2021.

8.2 Etapa II. Construcción del Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite, Utilizando los Cuescos de Palma de Indupalma Ltda

El diseño del filtro fue realizado a través del programa SolidWorks donde se lograron representar las especificaciones y medidas del filtro para proceder a la construcción de este (Ver apéndice A). El prototipo fue construido con láminas de acrílico transparente de espesores de 3.1 mm y 7.3 mm, el corte de las láminas fue realizado a través de cortadora láser. El tubo interno y externo fueron moldeados de forma cilíndrica con ayuda de horno de calor y pistola de calor con amarres y moldes de madera (figura 5). Al cilindro externo del filtro se le realizaron marcaciones del volumen de trabajo (70%, 85% y 80%). El cilindro interno tiene perforaciones de 2,5 mm para facilitar la entrada de agua a la matriz de cuescos de palma. Finalmente, se realizó el pegue de las piezas y materiales que complementan el funcionamiento del prototipo, realizando pruebas

de fugas para comprobar la efectividad del mismo y se lijaron las superficies para dar una apariencia más estética. Las especificaciones del filtro realizado fueron las siguientes:

Altura de trabajo: 32 cm

Altura del tanque: 40 cm

Altura de la columna interna (tubo draft): 14,57 cm

Volumen de trabajo (80%): 2512 mL

Volumen total: 3140 mL

Peso aproximado: 3 Kg

2 llaves de toma de muestra

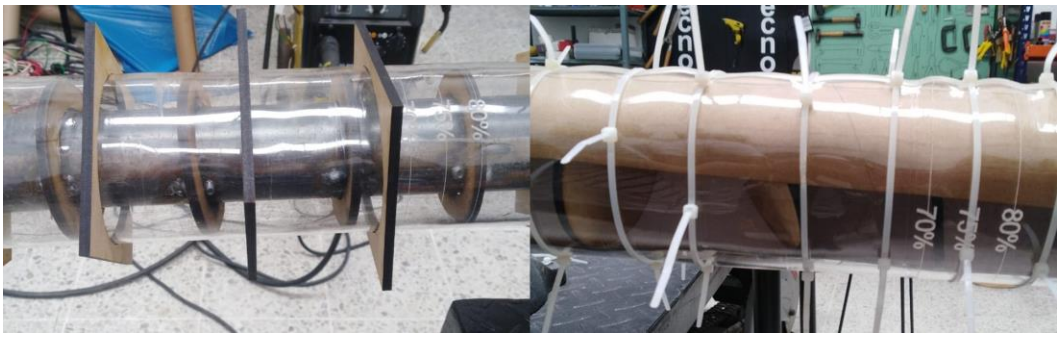
1 Calentador

1 manguera 3 mm

1 Difusor

Figura 5

Moldes de Madera y Amarres Plásticos Utilizados para Moldear de Forma Cilíndrica el Filtro



El prototipo cuenta con un sistema de aireación para oxigenar el medio por una bomba de aire de baja potencia, y con un calentador sumergible en agua para el control eléctrico de temperatura, manguera de 3 mm para el sistema de aireación, llaves para toma de muestra. (Figura 6).

Figura 6

Filtro tipo Airlift para el Tratamiento de Aguas Usadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite

8.3 Etapa III. Pruebas de Eficiencia del Sistema Biológico de Depuración sobre Muestras de Aguas Utilizadas Durante el Proceso de Extracción de Aceite

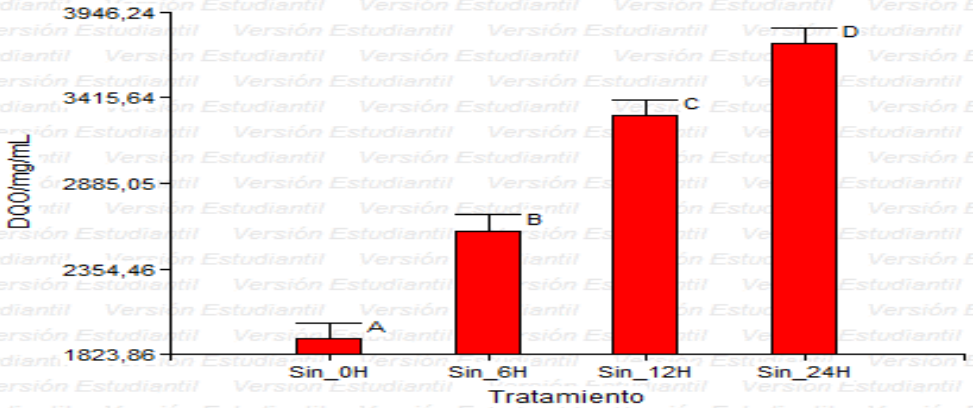
El filtro fue operado con un volumen de trabajo del 80% (2512 mL), con aireación y sin aireación generando los siguientes resultados:

8.3.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la figura 7, se pueden observar diferencias significativas en los distintos tratamientos ($p<0.05$). De acuerdo con esto, se evidenció que la DQO aumenta directamente con los tiempos de retención hidráulicos, puesto que la muestra inicial del agua residual arrojó un valor de 1920 mg/mL en comparación con lo obtenido en las horas evaluadas (Ver apéndice B) lo que muestra que el proceso de depuración del filtro no es tan efectivo sin la aplicación de aireación.

Figura 7

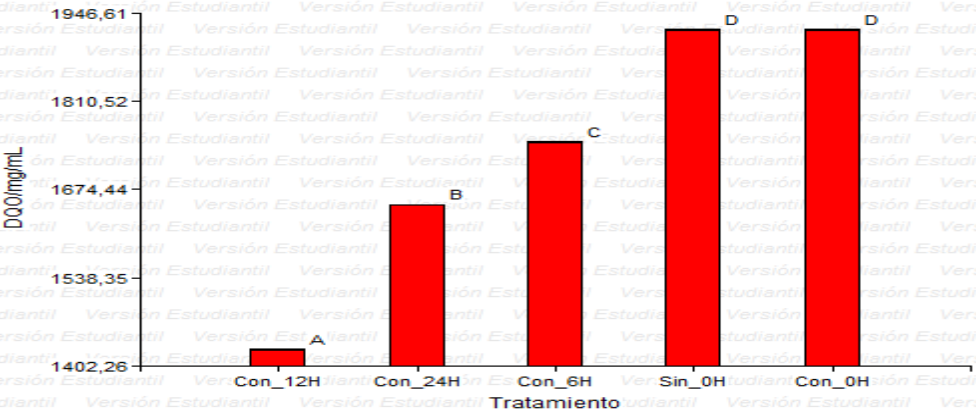
Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación de la DQO en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



En la figura 8 se observan diferencias significativas en los tratamientos ($p<0.05$), de acuerdo con esto, se evidenció que la aireación favorece la disminución de la DQO. A las 12 horas se obtuvo un valor de 1427 mg/mL lo que genera una disminución representativa con respecto a la muestra inicial (1920 mg/mL) (Ver apéndice B).

Figura 8

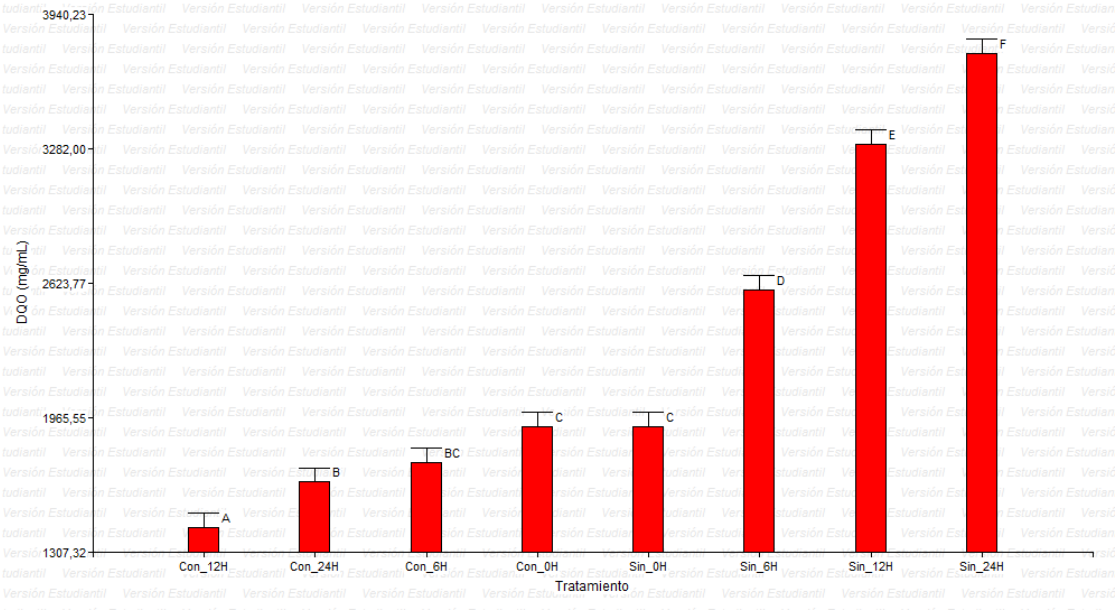
Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación de la DQO en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



En la figura 9 se presenta con mayor claridad los resultados de los análisis de la DQO con aireación y sin aireación, en los diferentes tiempos de retención empleados (Ver apéndice B). La menor concentración de la DQO se evidencia en el tiempo de retención de 12 horas con aireación con un valor de 1427 mg/mL. Según Rafo, E. & Ruiz, E. (2014) a mayor cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, más cantidad de oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla o degradarla. La actividad biológica es provocada por los microorganismos en condiciones aeróbicas, dando como consecuencia que la materia orgánica pierda sus propiedades contaminantes. Lo que explica los resultados obtenidos.

Figura 9

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con y sin Aireación de la DQO en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



Porcentaje de remoción de la DQO en el TRH de 12 horas con aireación.

$$E = \frac{(1920mg/L - 142\mathrm{m}g/L7)}{1920mg/L} X100$$

$$E = 25{,}67\%$$

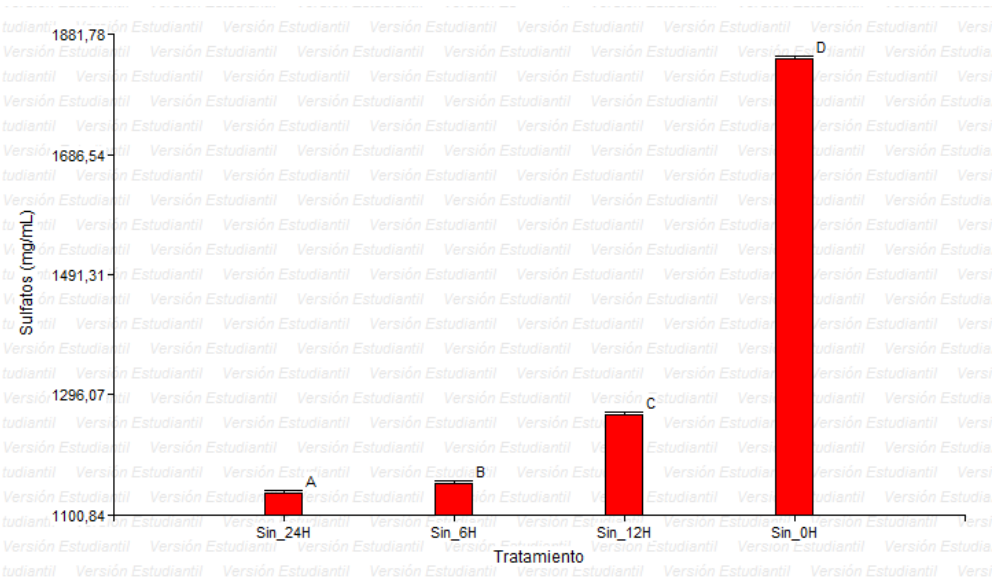
8.3.2 Sulfatos ($SO4^{2-}$)

En la figura 10, se pueden observar diferencias significativas en los distintos tratamientos ($p<0.05$).

De acuerdo con esto, se evidenció un comportamiento decreciente, es decir, a medida que aumenta el TRH, van disminuyendo los valores de este parámetro (Ver apéndice C). A las 24 horas el tratamiento presentó mayor eficiencia en el proceso de depuración (1136 mg/mL) con respecto a la muestra inicial del agua residual (1841 mg/mL).

Figura 10

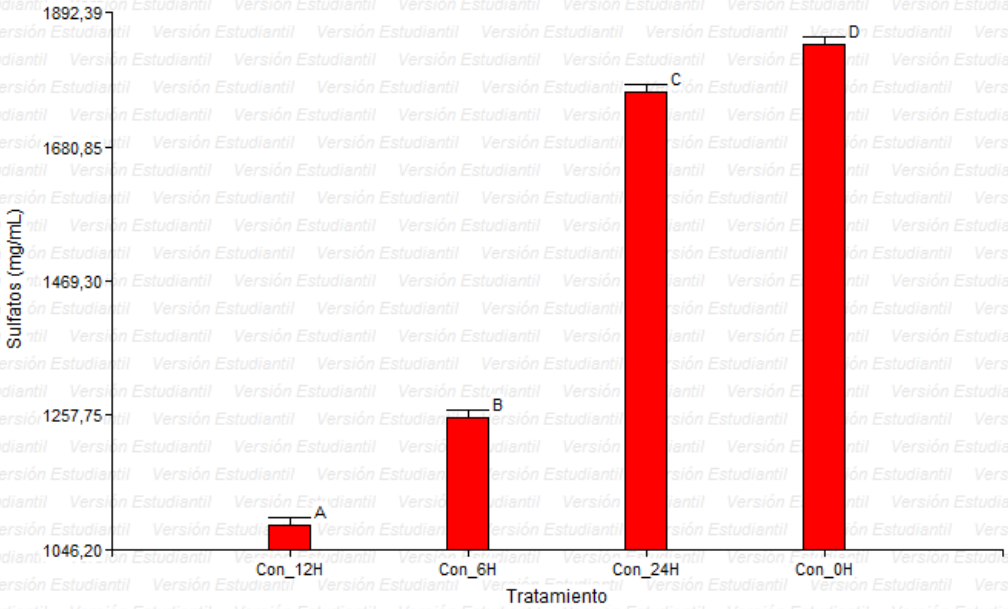
Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación los Sulfatos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



En la figura 11, se pueden observar diferencias significativas en los distintos tratamientos ($p<0.05$). De acuerdo con esto, se evidenció que a las 12 horas el tratamiento presentó mayor eficiencia (1084 mg/mL), seguido del TRH de 6 horas con (1253 mg/mL) en comparación con la muestra inicial de agua (1841 mg/mL). (Ver apéndice C).

Figura 11

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación los Sulfatos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



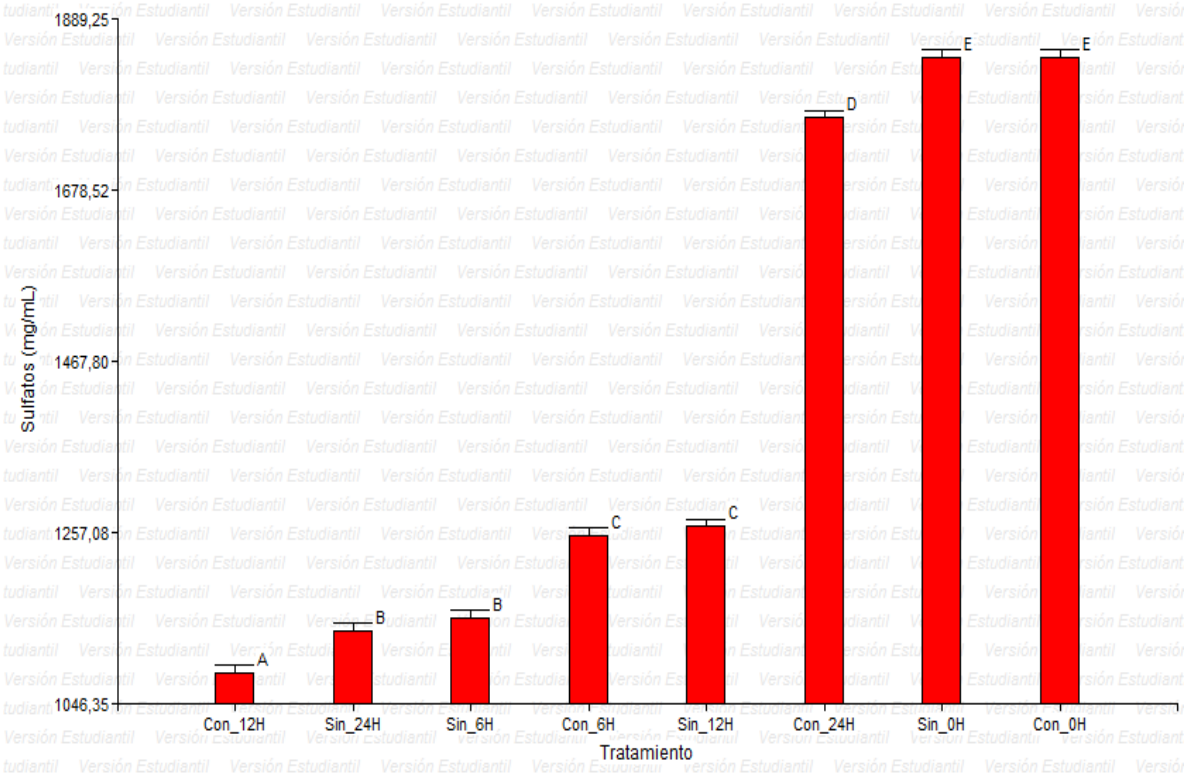
En la figura 12, se evidencia los análisis de sulfatos con aireación y sin aireación en los diferentes TRH utilizados. La menor cantidad de sulfatos se evidencia a las 12 horas con aireación con un valor de (1084 mg/mL), seguido del TRH de 24 horas sin aireación con un valor de (1136 mg/mL).

Según Pazmiño, A. (2015) los sulfatos son sólidos inorgánicos disueltos que poseen un impacto considerable en cuerpos de agua.

Por ello es importante diseñar sistemas de tratamiento de aguas que disminuyan considerablemente la carga de este contaminante. Los sulfatos en el agua residual del sistema de tratamiento disminuyen progresivamente en anaerobiosis por la acción de las bacterias sulfato reductoras, explicando la disminución del parámetro en el TRH de 24 horas sin aireación.

Figura 12

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con y sin Aireación de los Sulfatos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



Porcentaje de remoción de sulfatos en el TRH de 12 horas con aireación.

$$E = \frac{(1841mg/L - 1084\text{mg/L})}{1841mg/L} X100$$

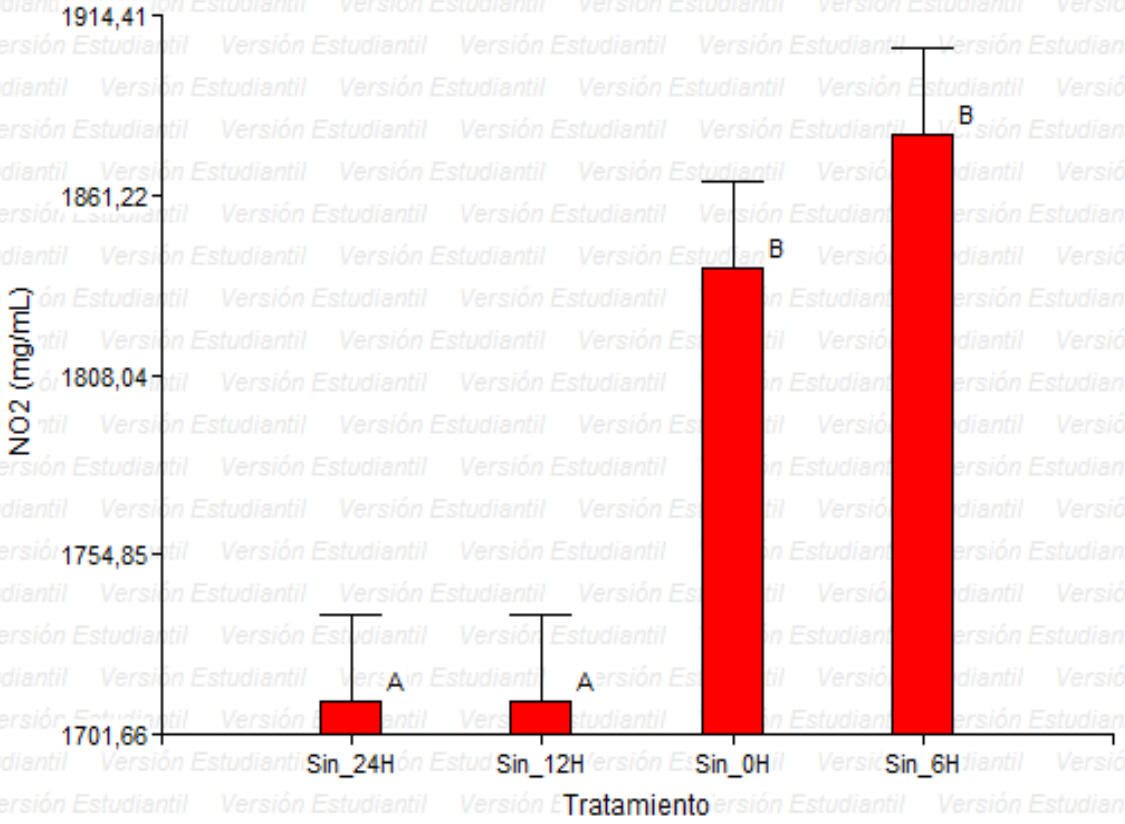
$$E = 41{,}1\%$$

8.3.3 Nitratos

En la figura 13, se pueden observar diferencias significativas en los distintos tratamientos ($p<0.05$). De acuerdo con esto, se evidenció que a las 12 y 24 horas generaron valores de 1711 mg/mL respectivamente, lo que representan una disminución significativa de nitratos con respecto a la muestra inicial (1839mg/L) (Ver Apéndice D).

Figura 13

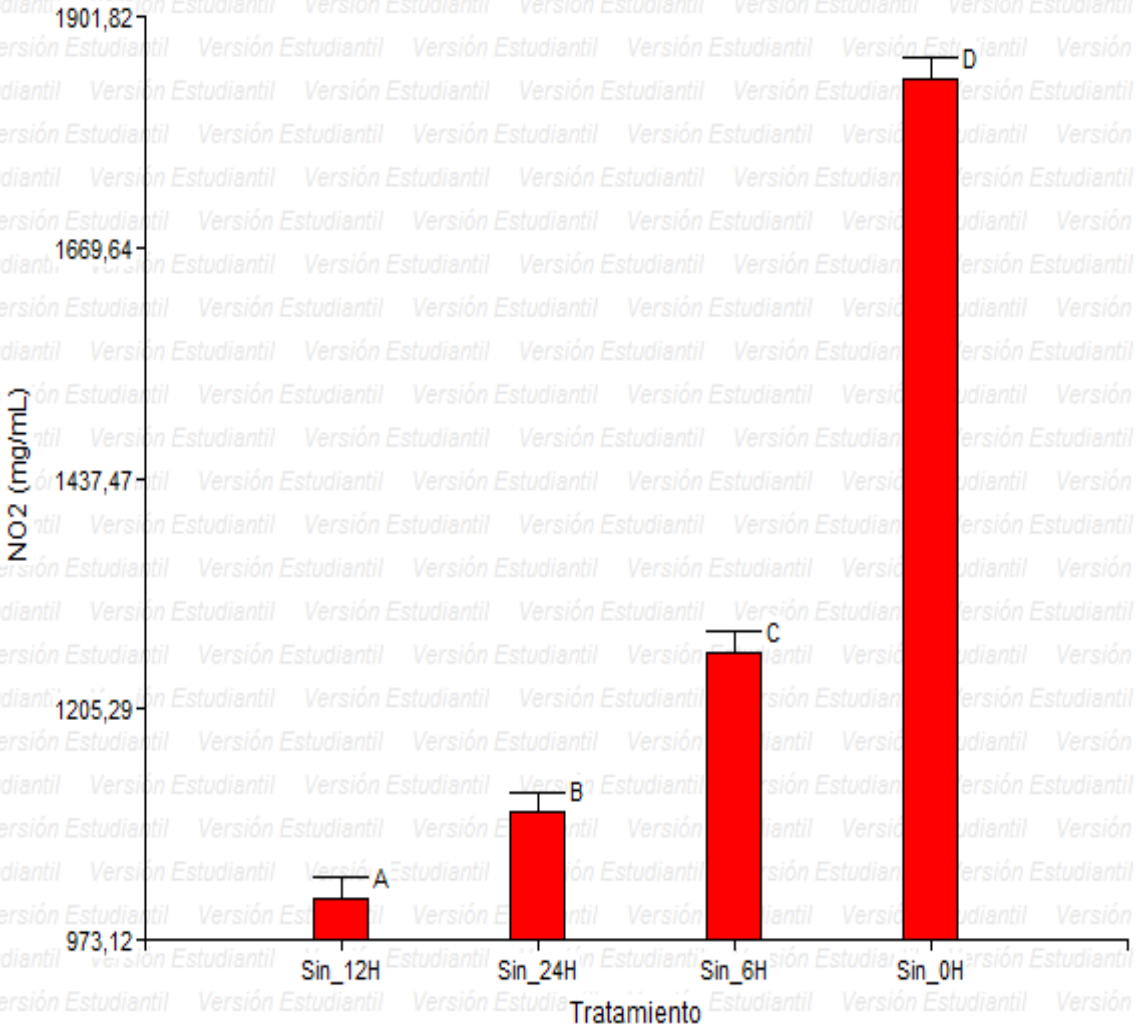
Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación de los Nitratos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



En la figura 14, se pueden observar diferencias significativas en los distintos tratamientos ($p<0.05$). De acuerdo con esto, se evidenció que los nitratos a las 12 horas con un valor de 1015 mg/mL presenta una mayor remoción con respecto a la muestra inicial (1839 mg/mL), lo que muestra que el proceso de depuración del filtro es efectivo con la aplicación de aireación. (Ver Apéndice D).

Figura 14

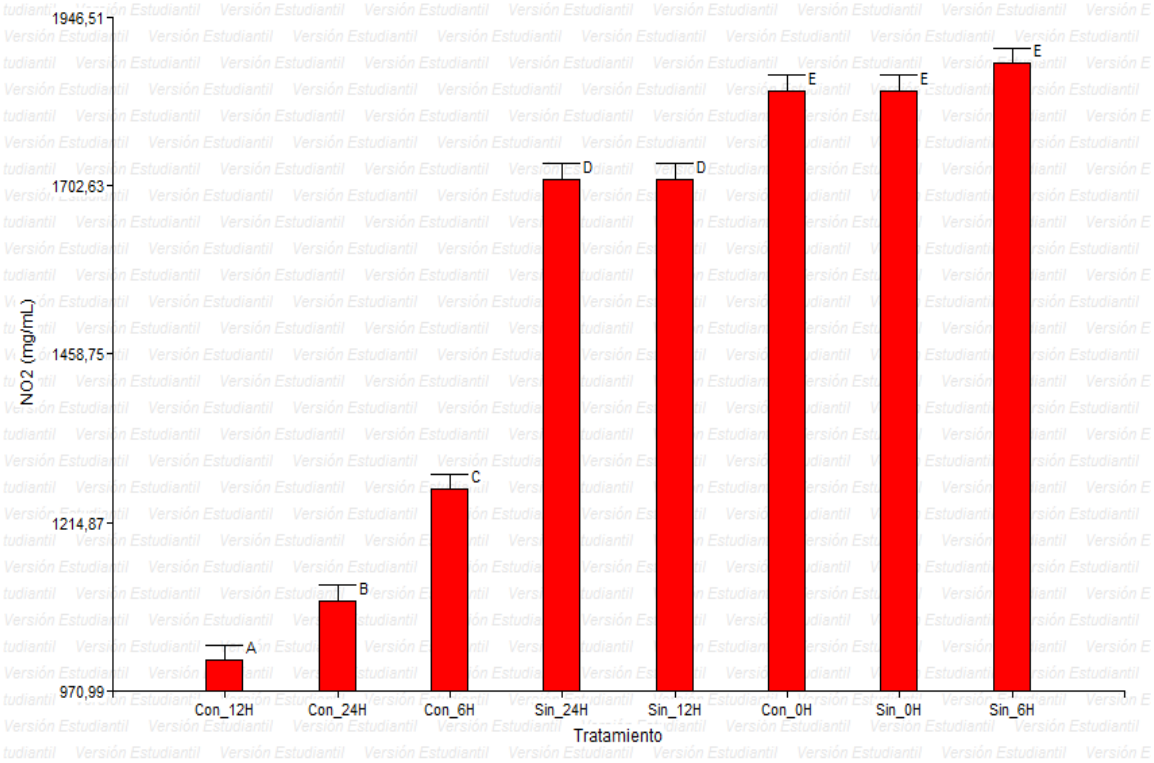
Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación de los Nitratos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



En la figura 15, se evidencia con mayor claridad los resultados de los nitratos con y sin aireación, donde se observa una mayor eficiencia del proceso a las 12 horas con aireación (1015 mg/mL), seguido del tratamiento de 24 horas con aireación (1101 mg/mL). (Ver Apéndice D).

Figura 15

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con y sin Aireación de los Nitratos en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



Porcentaje de remoción de nitratos en el TRH de 12 horas con aireación.

$$E = \frac{(1839mg/L - 1015\text{mg/L})}{1839mg/L} X100$$

$$E = 44{,}8\%$$

En relación a los resultados obtenidos, Bedoya, C. (2012) en su tesis doctoral menciona que en los procesos de nitrificación y desnitrificación pueden ocurrir simultáneamente en un único reactor cuando el amonio es oxidado por microorganismos heterótrofos nitrificantes y la reducción de nitrato por microorganismos desnitrificantes. El factor principal que influye en este proceso simultáneo es la concentración de materia orgánica: concentraciones altas provocan la inhibición de bacterias autótrofas nitrificantes, mientras que concentraciones bajas conducen al

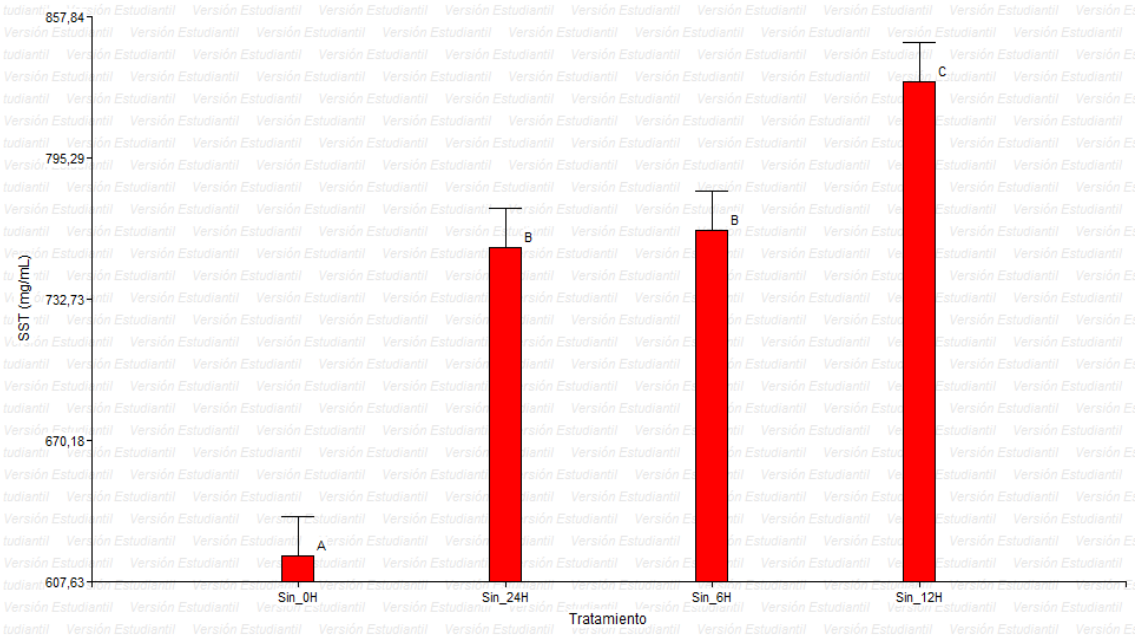
déficit de donador de electrones para las desnitrificantes. Es por esto, que en los resultados obtenidos, la concentración de materia orgánica en la muestra de agua, juega un papel importante en la degradación de nitratos.

8.3.4 Sólidos Suspendidos Totales

En la figura 16, se evidenció que los sólidos suspendidos totales (SST) aumentan directamente con los tiempos de retención hidráulicos, puesto que la muestra inicial arrojó un valor de (619mg/L). (Ver apéndice E) y a las 12 horas se evidencia un aumento con un valor de 829 mg/mL lo que muestra que el proceso de depuración del filtro no es efectivo sin la aplicación de aireación.

Figura 16

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos sin Aireación de los Sólidos Suspendidos Totales en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos

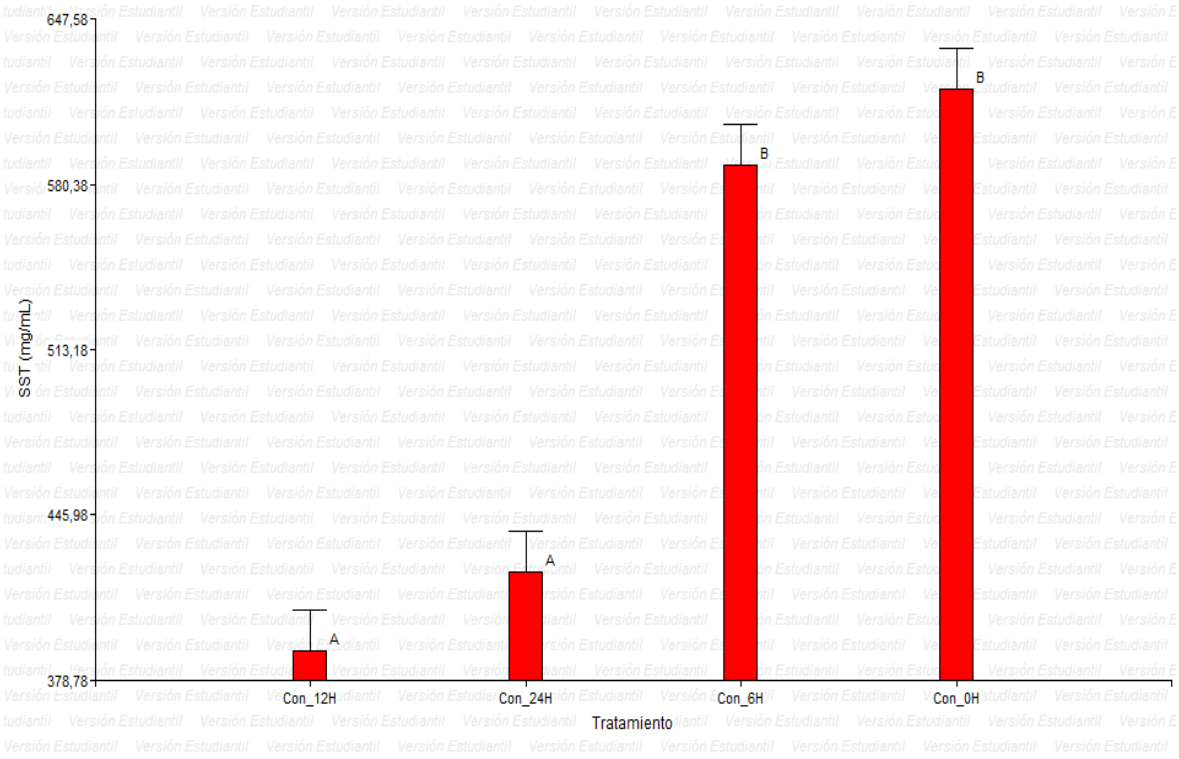


En la figura 17, se pueden observar diferencias significativas en los distintos tratamientos ($p<0.05$). De acuerdo con esto, se evidenció en el tiempo de retención de 12 horas con un valor

de 391 mg/mL, seguido del TRH de 24 horas con un valor de 423 mg/mL presenta una disminución significativa de sólidos suspendidos totales con respecto a la muestra inicial (619mg/L).

Figura 17

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación de los Sólidos Suspendidos Totales en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos

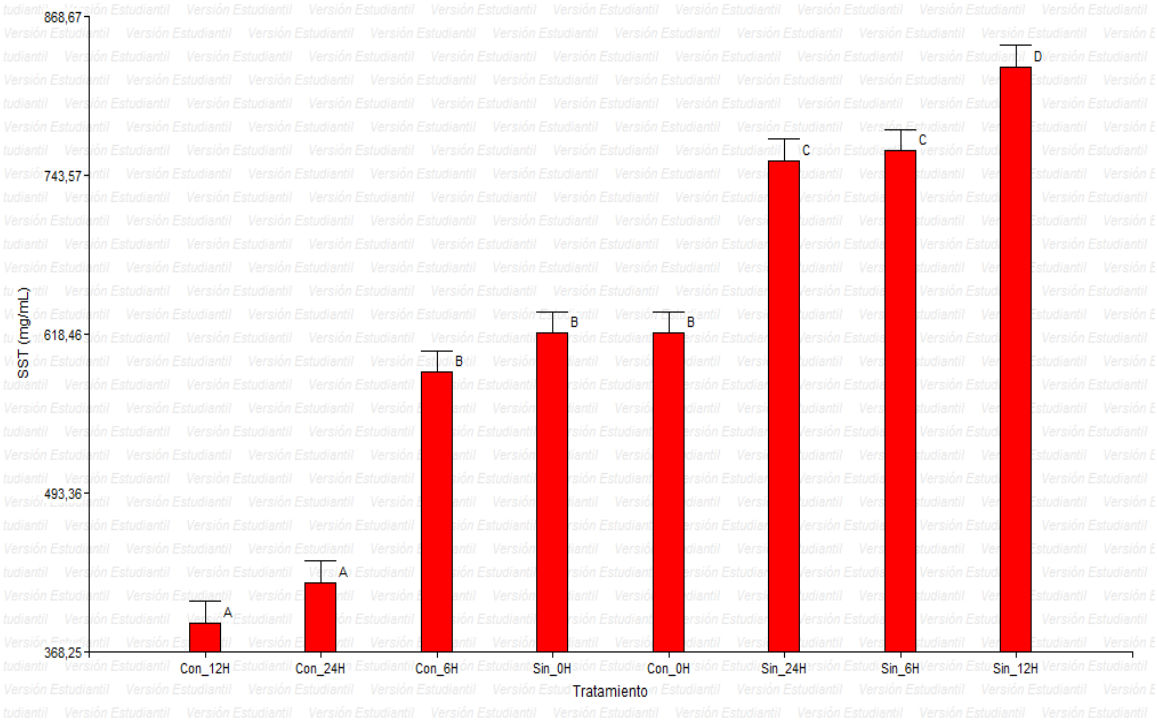


En la figura 18, se observa con mayor detalle las diferencias significativas de los tratamientos con aireación y sin aireación con respecto a los tiempos de retención utilizados, donde se evidencia una mejor remoción a las 12 horas con aireación con un valor de 391 mg/mL, y a las 24 horas con aireación con un valor de 423 mg/mL. En los tratamientos realizados sin aireación se evidencia que los aumentan significativamente respecto a la muestra inicial.

Demostrando así, que los tratamientos con aireación poseen mayor efecto de remoción de sólidos suspendidos totales.

Figura 18

Gráfico de Barras de los Resultados de los Tratamientos con Aireación y sin Aireación de los Sólidos Suspendidos Totales en Relación con los Tiempos de Retención Hidráulicos



Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en el TRH de 12 horas con aireación.

$$E = \frac{(619mg/L - 391\text{mg/L})}{619mg/L} X100$$

$$E = 63{,}83\%$$

Es importante resaltar que las características de este efluente residual pueden generar una serie de problemas al ser descargada a un cuerpo de agua dulce. Una elevada concentración de materia orgánica y temperatura pueden limitar la disponibilidad de oxígeno para los organismos

vivos, así mismo el alto contenido de sólidos pueden generar sedimentos y la presencia aceites y grasas dificultan la transferencia de oxígeno en los cuerpos de agua (Escaler, I., Mujeriego, R. 2001).

En Colombia, en la Resolución 631 de 2015, se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Los resultados de DQO, y SST, en el TRH de 12 horas con aireación, cumplen con los parámetros establecidos por la normativa colombiana. (Tabla 5)

Tabla 5

Valores Límites Máximos Permisibles de Parámetros Físico-Químicos para la Extracción de Aceites Vegetales Según la Resolución 631 del 2015

Parámetro	Resolución 631 del 2015	Resultados antes del tratamiento	Resultados después del tratamiento*
DQO	1500 mg/L	1920 mg/L	1427 mg/L
Nitratos	Análisis y reporte	1839 mg/L	1015 mg/L
Sólidos suspendidos totales	400 mg/L	619 mg/L	391mg/L

Nota. *Resultados del estudio en el TRH de 12 horas con aireación. Adaptado de la Resolución 631. 2015.

9. Conclusiones

El proceso con aireación resultó ser más efectivo en la remoción del DQO, SST, Nitratos y Sulfatos que el tratamiento sin aireación debido a que a mayor cantidad de materia orgánica contenida en la muestra de agua, más cantidad de oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla o degradarla.

El tiempo de retención hidráulica de 12 horas con aplicación de aire, presentan mejores resultados en cuanto a las características físico – químicas de la calidad de las aguas usadas en la extracción de aceite de palma.

El parámetro que tuvo mayor porcentaje de remoción durante el proceso con aireación fueron los sólidos suspendidos totales, con un porcentaje de 63,83%, seguido de nitratos con 44,8%, sulfatos con 41,1% y finalmente, DQO con 25,67%.

10. Recomendaciones

Se recomienda realizar análisis microbiológicos para evaluar la carga microbiológica al inicio y al final del proceso.

Se recomienda evaluar el proceso de depuración con tiempos de retención hidráulicos (TRH) diferentes, para observar su comportamiento.

Referencias Bibliográficas

Abnisa, F., Arami-Niya, A., Wan Daud, W., Sahu, J., & Noor, I. (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, *76*, 1073–1082. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.038

Acuña, A. (2000). *Proceso de extracción de aceite de palma africana mediante el desgranado del fruto fresco.* Industrias Acuña Ltda. INAL. https://palmaceite.tripod.com/desgranadofrio.

Ah Ngan Ma,. (2000). *Innovaciones en el manejo del efluente de las Plantas de beneficio de aceite de palma*. Revista Palmas, 21(2), 41-49. Recuperado a partir de https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/733

Álvarez, L. (2017). *Estandarización del proceso de producción de carbón activado por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial*. Fundación Universidad de América. https://hdl.handle.net/20.500.11839/6583

Althausen, M. (2017). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio- Convertir un residuo en un recurso. *Revista Palmas, 37, 31-37*. Recuperado a partir de https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11918

Arnaiz, C., Isac, L., Lebrato, J. (2000). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Escuela Universitaria Politécnica.

Barrios, B., Castro, Y., & Daza, H. (2018). *Elaboración de bloques de mampostería mediante el uso de mortero, adicionado con ceniza del cuesco y de fibra de palma africana en el departamento del meta.* Universidad Cooperativa de Colombia.

Bravo, C., Osorno, C., & Salgado, E. (2016). *Propuesta de un tratamiento para aceites y grasas de las aguas residuales de la microempresa "Productos verdes"*. Repositorio Institucional UNAN-Managua. http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/3504

Bedoya, C. (2012). *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal.* Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Betancourth, M., Botero, J., & Rivera, S. (2004). Biopelículas: una comunidad microscópica en desarrollo. Colombia Médica, 35(3 Supl 1), 34-39. Retrieved from https://colombiamedica.univalle.edu.co/index.php/comedica/article/view/312

Buenaventura, M. & Tamayo, M. (2010). *Análisis de los vertimientos en el área urbana del municipio de puerto Boyacá (Boyacá) al rio Magdalena y otras fuentes hídricas. Universidad* Libre, Facultad de Ingeniería.

Buzón, J. (2010). Fabricación de adoquines para uso en vías peatonales, usando cuesco de palma africana. *Revista Inge-CUC, 6*(6). https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/293/283

Cabrales, I. & Chachin, C. (2013). *Evaluación del efecto de depuración biológica de aguasresiduales urbanas a partir de un reactor de biopelícula fija y umergida con medio de soporte no convencional a escala de laboratorio*. Universidad de Santander, Buecaramanga, Colombia.

Carrere, R. (2006). *Palma aceitera de la cosmética al biodiesel. La colonización continúa* (H. Fonseca, Ed.). WRM. https://wrm.org.uy/es/libros-e-informes/palma-aceitera-de-la-cosmetica-al-biodiesel-la-colonizacion-continua/

Casey, E., Glennon, B., & Hamer, G. (1999). Oxygen mass transfer characteristics in a membrane-aerated biofilm reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, *62*(2), 183–192. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990120)62:2<183::AID-BIT8>3.0.CO;2-L

Chisti, Y. (1989). *Airlift bioreactors*. Elsevier Applied Science. https://www.worldcat.org/title/airlift-bioreactors/oclc/18959966

Chisti, Y., & Jauregui-Haza, U. J. (2002). Oxygen transfer and mixing in mechanically agitated airlift bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, *10*(2), 143–153. https://doi.org/10.1016/s1369-703x(01)00174-7

Cuao, A. (2009). *Estudio de las condiciones operativas en el proceso finca-extractora de la palma africana en el departamento de Magdalena*. Universidad Sergio Arboleda.

Cury R, K., Aguas M, Y., Martinez M, A., Olivero V, R., & Chams Ch, L. (2017). *Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento.* Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA, 9(S1), 122–132. https://doi.org/10.24188/recia.v9.ns.2017.530

Elbersen, W. (2013). *Residuos de aceite de palma disponibles para la bioeconomía, junto con el reciclaje de nutrientes.* Revista Palmas.

Espitia, F. (2017). *Diagnóstico, evaluación y planteamiento de mejora en los componentes de la planta de aguas residuales en el municipio de Buenavista Boyacá*. Universidad Católica de Colombia. http://hdl.handle.net/10983/15504

Flórez, D., Barco, J., & Rincón, S. (2016). *Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo*. Revista Tecnura, 20(49), 45. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a03

García, J. (1996). *Manejo de efluentes de plantas extractoras de aceite de palma. Centro de investigación en palma de aceite*. FEDEPALMA.

García, J., Cárdenas, M. & Yáñez, E. (2010). *Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia.* Revista Palmas. 31, (2) 41-48.

Escaler, I., Mujeriego, R. (2001). *Ingeniería del agua*. 8: 67-77.

González–Brambila & López–Isunza, (2008). *Comportamiento de un reactor de biopelícula para tratamiento de agua residual a diferentes velocidades de flujo.* Revisa mexicana de ingeniería química. 7: 3 183-19.

Instituto Nacional de Ecología. (2021). Recuperado de *http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/biofiltra.html#top*

Ibañez, E. (2019). *Estudio de la generación y composición de biogás en tratamiento de efluentes con biodigestores carpados en la industria de extracción de aceite de palma mediante simulación*. Universidad Autónoma de Bucaramanga. http://hdl.handle.net/20.500.12749/7108

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM] (2007). *Protocolo Estandarizado para Análisis de Aguas del IDEAM: Toma y preservación de muestras.* Bogotá: IDEAM.

Latorre, A. (2012). *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización del agua residual del proceso de hemodiálisis de la clínica Menydial – Riobamba.* Escuela Superior Politecnica De Chimborazo.

Leon, D. (2019). *Evaluación del impacto ambiental en la industria de la palma aceitera, en las provincias de Coronel PORTILLO Y Padre Abad Ucayali.* Perú, Universidad Nacional Hermilio Valdizán.

Malacatus-Cobos, P., Guerrero-Rodríguez, B., & Llerena-Carrera, G. (2017). *Generación de efluentes en el proceso de extracción de aceite crudo de palma en el ecuador*. Dominio

de las ciencias, *3*(4), 459–469. https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/696

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural , Bogotá, Colombia. (2005). *Estrategia para el desarrollo competitivo del sector palmero colombiano*. AgroSavia. http://hdl.handle.net/20.500.12324/21359

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia. (2000). *Guía ambiental para la formulación de planes de pretratamiento de efluentes industriales*. AgroSavia. http://hdl.handle.net/20.500.12324/18912

Mujica, C. (2019). *Evolución del sector palmicultor*. Universidad de investigación y desarrollo. https://www.udi.edu.co/images/investigaciones/publicaciones/libros/porter/08/Libro-EvoluciondelSectorPalmicultor.pdf

Ortiz, Y. (2019). *La palma de aceite como ejemplo para la agroindustria en Colombia*. Fundación Universidad de América.

Pérez, A. (2015). *Caracterización de aguas residuales de la industria aceitera chiapaneca y sus efectos al suelo*. Universidad de Ciencias Y Artes de Chiapas. https://es.scribd.com/document/433928126/CARACTERIZACION-DE-AGUAS-RESIDUALES-DE-LA-INDUSTRIA-ACEITERA-CHIAPANECA-Y-SUS-EFECTOS-AL-SUELO

Pérez, M. (2006). *Tratamiento avanzado de aguas residuales para riego mediante oxidación con ozono: Una alternativa ecológica*. CosemarOzono. http://www.cosemarozono.es/pdf/noticia_22.pdf

Pertuz, A. P., & Santamaría, L. E. (2014). *La palmicultura colombiana: Sostenibilidad económica, social y ambiental*. Tendencias, 15(1), 173–186. https://doi.org/10.22267/rtend.141501.55

Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Industrial Data, 17(1),71-80. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81640855010

Reinosa, D. (2009). *Costos ambientales en el proceso de extracción del aceite de Palma. estudio de un caso.* Revista Venezolana de Gerencia, *14*(46). https://doi.org/10.31876/revista.v14i46.10532

Romero, J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño* (3.ª ed.). Escuela colombiana de ingeniería.

RSPO Roundtable on Sustainable Palm Oil. (2018). *Agraria industrial la palma limitada - Indupalma LTDA.* Recuperado 2020, de https://rspo.org/members/1885/INDUSTRIAL-AGRARIA-LA-PALMA-LIMITADA-INDUPALMA-LTDA

Sangucho, W. & Rodriguez, A. (2018). *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.* Escuela politécnica nacional, facultad de ingeniería civil y ambiental.

Santosa, S. J. (2008). Palm Oil Boom in Indonesia: From Plantation to Downstream Products and Biodiesel. *CLEAN - Soil, Air, Water*, *36*(5–6), 453–465. https://doi.org/10.1002/clen.200800039

Saval, S. (2012). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro*. Academia. Recuperado septiembre de 2021, de

https://www.academia.edu/23775116/Aprovechamiento_de_Residuos_Agroindustriales_Pasado_Presente_y_Futuro

Talero, G., Rincón, S., & González, A. (2017). *Torrefacción de tusa y fibra de palma africana (Elaeis guineensis) procedente de los llanos orientales de Colombia. Determinación del efecto de la temperatura de torrefacción en las características de los productos*. Revista Palmas, 38(1), 27-47. Recuperado a partir de https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12043

Tejero, J., Esteban, A., Díez, R. *et al*. (2012). *Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales: veinticinco años de investigación del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria.* Revista de ingeniería civil.

Torres, J. (2006). *Evaluación de la influencia de plantaciones adultas sobre cultivos jóvenes en la calidad de conformación de racimos en el híbrido cirad de palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.) en Quinindé*. http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2866

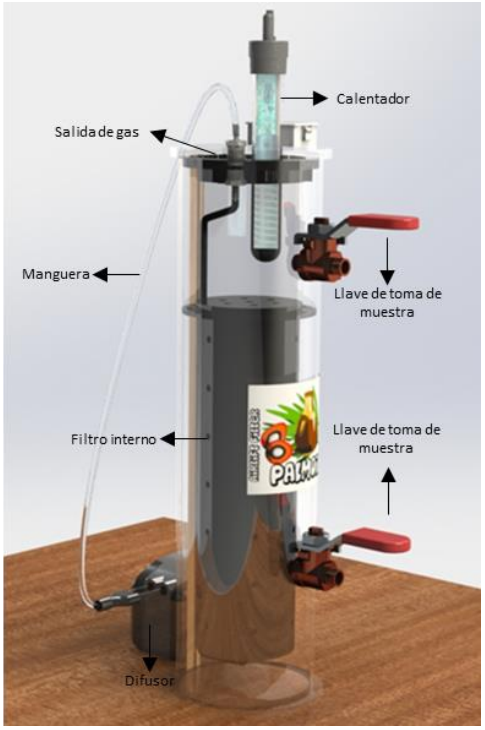
Van Dam, J. (2016). *Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa*. Palmas, 37(Especial Tomo II), pp. 149-156.

Villacis, A. (2011). *Estudio de un sistema de depuración de aguas residuales para reducir la contaminación de río ambato y los sectores aledaños, en el sector de pisocucho, de la parroquia izamba, del cantón ambato, provincia de tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato. https://pdfslide.tips/documents/tesis-55f057c78d3b3.html

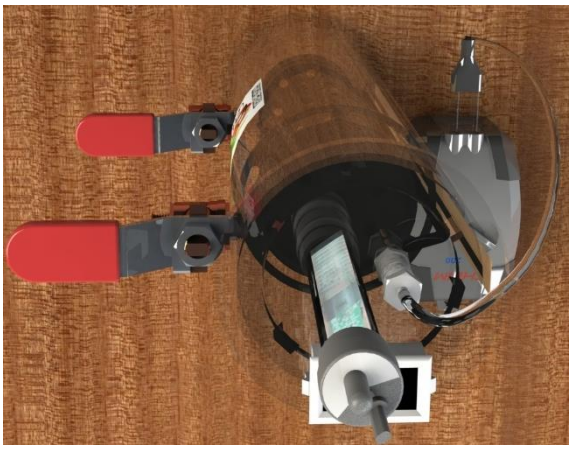
Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté. https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXywC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_vpt_read#v=onepage&q&f=false

Apéndices

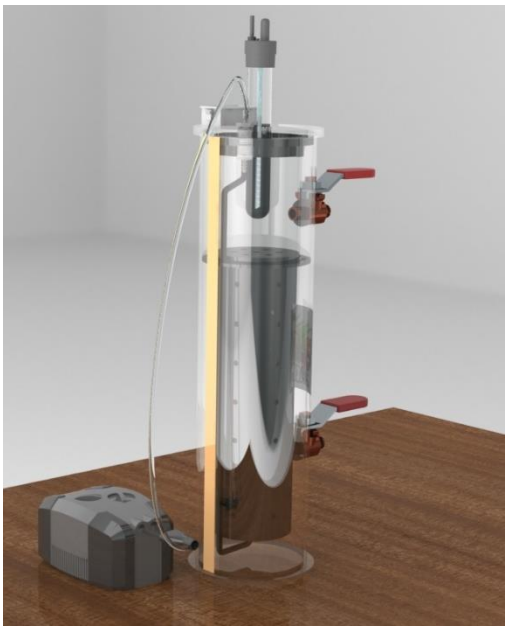
Apéndice A. Diseño del Prototipo



**Nota:* Diseño realizado en SolidWorks del filtro tipo Airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite. Fuente propia



**Nota:* Vista superior del diseño del filtro tipo Airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite. Realizado en SolidWorks. Fuente propia



**Nota:* Vista anterior del diseño del filtro tipo Airlift para el tratamiento de aguas usadas durante el proceso de extracción de aceite. Realizado en SolidWorks Fuente propia.

**Nota:* Filtro interno con perforaciones de 2,5 mm para facilitar la entrada de agua a la matriz de cuescos de palma. Fuente propia.

Apéndice B. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DQO/mg/L	12	0,96	0,95	5,98

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5828698,25	3	1942899,42	65,07	<0,0001
Tratamiento	5828698,25	3	1942899,42	65,07	<0,0001
Error	238866,67	8	29858,33		
Total	6067564,92	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=325,34724

Error: 29858,3333 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
Sin_0H	1920,33	3	99,76	A			
Sin_6H	2590,00	3	99,76		B		
Sin_12H	3306,00	3	99,76			C	
Sin_24H	3750,00	3	99,76				D

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de la DQO sin aireación.

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DQO/mg/L	13	1,00	1,00	0,11

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	431602,77	4	107900,69	30828,77	<0,0001
Tratamiento	431602,77	4	107900,69	30828,77	<0,0001
Error	28,00	8	3,50		
Total	431630,77	12			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=4,16785

Error: 3,5000 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
Con_12H	1427,00	3	1,08	A			
Con_24H	1650,33	3	1,08		B		
Con_6H	1747,67	3	1,08			C	
Sin_0H	1920,00	1	1,87				D
Con_0H	1920,33	3	1,08				D

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de la DQO sin aireación.

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DQO/mg/mL	24	0,98	0,98	5,34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	14925666,29	7	2132238,04	142,81	<0,0001
Tratamiento	14925666,29	7	2132238,04	142,81	<0,0001
Error	238894,67	16	14930,92		
Total	15164560,96	23			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=211,50175

Error: 14930,9167 gl: 16

Tratamiento	Medias	n	E.E.						
Con_12H	1427,00	3	70,55	A					
Con_24H	1650,33	3	70,55		B				
Con_6H	1747,67	3	70,55		B	C			
Con_0H	1920,33	3	70,55			C			
Sin_0H	1920,33	3	70,55			C			
Sin_6H	2590,00	3	70,55				D		
Sin_12H	3306,00	3	70,55					E	
Sin_24H	3750,00	3	70,55						F

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de la DQO con y sin aireación.

Apéndice C. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de Sulfatos (SO_4^{2-}).

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Sulfatos (mg/mL)	12	1,00	1,00	0,59

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1000987,58	3	333662,53	5227,09	<0,0001
Tratamiento	1000987,58	3	333662,53	5227,09	<0,0001
Error	510,67	8	63,83		
Total	1001498,25	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=15,04313

Error: 63,8333 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
Sin_24H	1136,33	3	4,61	A			
Sin_6H	1152,67	3	4,61		B		
Sin_12H	1264,33	3	4,61			C	
Sin_0H	1841,67	3	4,61				D

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de sulfatos sin aireación.

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Sulfatos (mg/mL)	12	1,00	1,00	1,43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1261980,67	3	420660,22	932,21	<0,0001
Tratamiento	1261980,67	3	420660,22	932,21	<0,0001
Error	3610,00	8	451,25		
Total	1265590,67	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=39,99659

Error: 451,2500 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
Con_12H	1084,67	3	12,26	A			
Con_6H	1253,33	3	12,26		B		
Con_24H	1767,00	3	12,26			C	
Con_0H	1841,67	3	12,26				D

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de sulfatos con aireación.

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Sulfatos (mg/mL)	24	1,00	1,00	1,13

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2377094,29	7	339584,90	1318,56	<0,0001
Tratamiento	2377094,29	7	339584,90	1318,56	<0,0001
Error	4120,67	16	257,54		
Total	2381214,96	23			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=27,77758

Error: 257,5417 gl: 16

Tratamiento	Medias	n	E.E.					
Con_12H	1084,67	3	9,27	A				
Sin_24H	1136,33	3	9,27		B			
Sin_6H	1152,67	3	9,27		B			
Con_6H	1253,33	3	9,27			C		
Sin_12H	1264,33	3	9,27			C		
Con_24H	1767,00	3	9,27				D	
Sin_0H	1841,67	3	9,27					E
Con_0H	1841,67	3	9,27					E

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de sulfatos y sin aireación.

Apéndice D. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de Nitratos

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
NO2 (mg/mL)	12	0,81	0,75	2,46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	68072,33	3	22690,78	11,72	0,0027
Tratamiento	68072,33	3	22690,78	11,72	0,0027
Error	15490,67	8	1936,33		
Total	83563,00	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=82,85227

Error: 1936,3333 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Sin_6H	1879,33	3	25,41	A	
Sin_0H	1839,67	3	25,41	A	
Sin_12H	1711,67	3	25,41		B
Sin_24H	1711,33	3	25,41		B

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de nitratos sin aireación.

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
NO2 (mg/mL)	12	0,99	0,99	2,65

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1239141,58	3	413047,19	346,42	<0,0001
Tratamiento	1239141,58	3	413047,19	346,42	<0,0001
Error	9538,67	8	1192,33		
Total	1248680,25	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=65,01494

Error: 1192,3333 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
Con_0H	1839,67	3	19,94	A			
Con_6H	1262,67	3	19,94		B		
Con_24H	1101,33	3	19,94			C	
Con_12H	1015,33	3	19,94				D

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de nitratos con aireación.

Apéndice E. Análisis Estadísticos de los Análisis Físico-Químicos de Sólidos Suspendidos Totales

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
SST (mg/mL)	12	0,91	0,87	4,08

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	69948,25	3	23316,08	25,47	0,0002
Tratamiento	69948,25	3	23316,08	25,47	0,0002
Error	7322,67	8	915,33		
Total	77270,92	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=56,96446

Error: 915,3333 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
Sin_12H	829,00	3	17,47	A		
Sin_6H	763,00	3	17,47		B	
Sin_24H	755,33	3	17,47		B	
Sin_0H	619,00	3	17,47			C

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de sólidos suspendidos totales sin aireación.

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
SST (mg/mL)	12	0,95	0,93	5,61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	118980,00	3	39660,00	49,35	<0,0001
Tratamiento	118980,00	3	39660,00	49,35	<0,0001
Error	6428,67	8	803,58		
Total	125408,67	11			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=53,37401

Error: 803,5833 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Con_0H	619,00	3	16,37	A	
Con_6H	588,33	3	16,37	A	
Con_24H	423,00	3	16,37		B
Con_12H	391,00	3	16,37		B

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

**Nota:* Análisis de varianza de los análisis físico – químicos de sólidos suspendidos totales con aireación.