

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN EMPLEANDO COMO
MEDIO FILTRANTE CUESCO DE PALMISTE PARA DEPURAR
AGUAS RESIDUALES SINTÉTICAS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

WINYFRED MICHELLE LOMAS SAMANIEGO

winyfred.lomas@epn.edu.ec

DIRECTOR: MSc. MARÍA BELÉN ANDÁS SANDOVAL

maria.aldas@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, **WINYFRED MICHELLE LOMAS SAMANIEGO**, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

WINYFRED MICHELLE LOMAS SAMANIEGO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Winyfred Michelle Lomas Samaniego, bajo mi supervisión.

MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

WINYFRED MICHELLE LOMAS SAMANIEGO

MSc. MARÍA BELÉN ANDÁS SANDOVAL

NOMBRE_COLABORADOR(ES)

AUSPICIO

El presente proyecto de investigación contó con el auspicio financiero del proyecto **(PIGR 19-10) Aprovechamiento de desechos industriales de aceite de palma africana en el desarrollo de polímeros compostables, composites y sistemas de biofiltración**, ejecutado en el Centro de Investigación Aplicada a Polímeros (CIAP).

DEDICATORIA

A mi hermosa madre, Liliana Samaniego, porque todo lo que soy y todo lo que he logrado es gracias a usted, TE AMO MI REINA.

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar agradeciendo a mi Dios por la vida, la salud y el alimento que me regala todos los días, por ser un padre generoso que nunca me ha abandonado.

A mi amada madre, por ser mi ejemplo, mi guía, mi motivación de continuar y cumplir todas las metas que me propongo, gracias por los consejos, por apoyarme en todo lo que quiero hacer, por las risas, las experiencias tan maravillosas que hemos vivido y sobre todo gracias por el amor tan incondicional que me ha brindado siempre. Las palabras se hacen cortas para demostrar todo el amor y agradecimiento que siento por usted. Gracias Don Luis †, por creer en mí.

A mi querido hermano; Shay, gracias ñaño por darme ánimos siempre y decirme que yo puedo con todo, aprendo todo lo bueno de ti. 我爱你, 哥哥

A mi precioso sobrino; Nico, mi amor lindo gracias por decirme ¡Que te vaya bien en la U ñaña!, por inspirarme a ser mejor para darte un buen ejemplo.

BJSV, gracias.

A mi novio Alexander, sin tu apoyo no lo hubiera logrado.

A mis amigas de toda la vida. A mis amigos de la universidad; Pauli, gracias por ser ese ángel que me acompañó durante toda la carrera, Pao, Andre y Andrés; gracias por todas las risas, por compartir los mejores momentos juntos y crear inolvidables recuerdos. Para todos ellos, éxito en sus vidas.

A mi querida Ing. Ma Belén Aldás, por ser mi directora de tesis, por toda su ayuda, colaboración, guía, consejos y sobre todo paciencia. Es un ejemplo de profesional para mí, mis mejores deseos siempre. Al Inge Vladi y a la Ing. Cris Almeida por brindarme sus consejos para la realización de este trabajo.

A mí, por no temer a empezar de cero.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AUSPICIO.....	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE ANEXOS.....	X
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Aguas residuales.....	4
1.4.2 Generación y caracterización de las aguas residuales	5
1.4.3 Depuración de las aguas residuales.....	8
1.4.4 Biofiltración	9
1.4.5 Biofiltro de flujo libre	12
1.4.6 Cuesco.....	13
1.4.7 Espectroscopía FTIR	14
1.4.8 Espectroscopía Raman:	15
1.4.9 Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	15
2. METODOLOGÍA	16
2.1 Preparación y caracterización del material filtrante orgánico	16

2.1.1	Preparación de material	16
2.2	Caracterización física y química del material filtrante mediante normas técnicas astm.....	17
a)	Contenido de humedad.....	17
b)	Densidad real y aparente	17
c)	Porosidad.....	19
d)	Extractivos	19
e)	Lignina	20
f)	Hemicelulosa y celulosa.....	20
g)	Biopelícula	21
2.3	Caracterización de los efluentes a tratar	22
2.3.1	Aguas residual artificial doméstica	22
2.4	Construcción del sistema de biofiltración	27
2.4.1	Descripción de la construcción de sistema experimental.....	27
2.4.2	Alimentación del sistema.....	28
2.4.3	Acondicionamiento de los biofiltros	28
2.4.4	Monitoreo de los biofiltros	30
2.4.5	Evaluación de las eficiencias de los sistemas de biofiltración.....	30
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
3.1	Resultados	32
3.1.1	Caracterización del material filtrante	32
3.1.2	Caracterización de los efluentes a tratar	39
3.1.3	Cvaluación de los sistemas de biofiltración	40
3.2	CONCLUSIONES	55
3.3	RECOMENDACIONES	56
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5.	ANEXOS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características de las aguas residuales y fuentes de origen	6
Tabla 2.	Composición típica de tres clases de aguas residuales domésticas.....	7
Tabla 3.	Tipos de tratamientos para descontaminar aguas residuales	9
Tabla 4.	Eficiencias de remoción de materiales filtrantes orgánicos.....	12
Tabla 5.	Densidad del agua a 25 °C	18
Tabla 6.	Composición del agua artificial.....	23
Tabla 7.	Caracterización del afluente	25
Tabla 8.	Composición de los biofiltros.....	29
Tabla 9.	Periodicidad del monitoreo	30
Tabla 10.	Características físicas del cuesco	32
Tabla 11.	Características químicas del cuesco	33
Tabla 12.	Parámetros iniciales de las aguas residuales artificiales	39
Tabla 13.	Eficiencia de remoción de DQO durante el periodo monitoreado	42
Tabla 14.	Análisis ANOVA de los biofiltros 2, 4 y 6 (75 cm de cuesco)	43
Tabla 15.	Eficiencia de remoción de NT durante el periodo monitoreado.....	44
Tabla 16.	Análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6 (75 cm de cuesco)	45
Tabla 17.	Eficiencia de remoción de FT durante el periodo monitoreado.....	46
Tabla 18.	Análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6 (75 cm de cuesco)	47
Tabla 19.	Porcentaje de remoción de Sólidos suspendidos totales durante el monitoreo	48
Tabla 20.	Análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6 (75 cm de cuesco)	49
Tabla 21.	Temperaturas semanales en los biofiltros	50
Tabla 22.	Comportamiento de la temperatura en el monitoreo.....	51
Tabla 23.	Cantidad de OD medido en los biofiltros	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Empresa extractora, donde se obtuvo el cuesco de palmiste	16
Figura 2.	Tanque de distribución y sistema de biofiltración	27
Figura 3.	Alturas de los biofiltros	29
Figura 4.	Espectroscopía FTIR del cuesco de palmiste original	34
Figura 5.	Espectroscopía FTIR del cuesco de palmiste del filtro 6 al final de la operación.....	35
Figura 6.	Imagen SEM del cuesco de palmiste original	36
Figura 7.	Espectroscopía Raman del cuesco limpio	37
Figura 8.	Espectroscopía Raman final de operaciones filtro 6.....	38
Figura 9.	Porcentaje de remoción de la DQO durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo	40
Figura 10.	Porcentaje de remoción de la DQO en el periodo de monitoreo.....	42
Figura 11.	Porcentaje de remoción de Nitrógeno total durante el monitoreo	44
Figura 12.	Porcentaje de remoción de Fósforo total durante el monitoreo.....	46
Figura 13.	Porcentaje de remoción de Sólidos suspendidos totales durante el monitoreo	48
Figura 14.	Biofilm presente en el cuesco.....	53
Figura 15.	Micrografía SEM a 1000X de la muestra Cuesco (MI-20-0669) / Micrografía SEM a 1000X de la muestra Filtro 6 (MI-21-0752).....	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I.	MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y Espectroscopia Raman.....	62
Anexo II.	MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y Espectroscopia Raman del filtro 3 y 6.....	66
Anexo III.	ANÁLISIS FTIR DEL CUESCO LIMPIO Y DEL FILTRO 6	70
Anexo IV.	Contrucción de los biofiltros	71
Anexo V.	Análisis físicos del cuesco.....	71
Anexo VI.	Análisis químicos del cuesco.....	74
Anexo VII.	Preparación de aguas residuales artificiales domésticas.....	75
Anexo VIII.	Análisis de DQO, NT, FT, SST, OD, PH y T.....	76
Anexo IX.	Datos estadísticos caracterización del cuesco	78
Anexo X.	Datos estadísticos funcionamiento de los biofiltros	81

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

ASTM	American Society for Testing and Materials
CIAP	Centro de Investigación Aplicado a Polímeros
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPN	Escuela Politécnica Nacional
FTIR	Fourier Transform infrared spectroscopy
H₂SO₄	Ácido sulfúrico
LDIA	Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
N	Nitrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Fósforo
PET	Polietilentereftalato
pH	Potencial de Hidrógeno
SDT	Sólidos disueltos totales
SS	Sólidos suspendidos
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles

RESUMEN

En el presente trabajo se construyeron 6 biofiltros a escala de laboratorio con medio filtrante el cuesco de palmiste y se les administró agua residual doméstica artificial durante 3 meses para descontaminar las mismas como propuesta de aprovechamiento de este material que usualmente termina en el relleno sanitario o en botaderos.

Al inicio, se realizó la caracterización físico-química del cuesco, la cual se dividió en humedad, densidad real y aparente, porosidad, extractivos, lignina, celulosa y hemicelulosa.

Posteriormente se lavó, se secó el material en horno y se tamizó en diferentes tamaños de partícula con un medio geométrico de 5-6.5 mm, 6.5-8 mm y 8-10 mm para los filtros, y para los demás análisis entre 250 a 425 μm . Seguido a esto, se armaron los biofiltros de la forma descrita a continuación, la capa de soporte con 5 cm grava de entre 0.1 y 1 cm de diámetro, la capa activa con una altura entre 45 y 75 cm de cuesco, con diferentes diámetros descritos anteriormente, y la capa final de 5 cm de viruta para mejorar la distribución del caudal de entrada.

Finalmente se acondicionaron los biofiltros durante un mes y durante 3 meses consecutivos se monitorearon los siguientes parámetros 2 veces por semana: DQO, Nitrógeno total (NT), Fósforo total (FT), Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Temperatura (T) y pH. A partir de los resultados obtenidos en los biofiltros, se evidenció que el tratamiento permite descontaminar aguas residuales domésticas con unos valores máximos de remoción de DQO (97.04% en el filtro 2), Nitrógeno (62.22% en el filtro 6), Fósforo total (51.44% en el filtro 6), SST (88.75% en el filtro 6) por lo que se determinó que el mejor diámetro de partícula para la utilización de estos biofiltros es de 8-10 mm y con una altura de 75 cm de cuesco.

Palabras clave: biofiltros, cuesco, aguas residuales artificiales

ABSTRACT

In the present work, 6 biofilters were elaborated at laboratory scale with palm kernel shell as filter medium and artificial domestic wastewater was administered to them for 3 months to decontaminate them as a proposal to take advantage of this material that usually ends up in the sanitary landfill or in dumps.

At the beginning, all the physical-chemical characterization of the hull was carried out, which was divided into humidity, real and apparent density, porosity, extractives, lignin, cellulose and hemicellulose.

Subsequently, the material was washed, oven-dried and sieved in different particle sizes with a geometric medium of 5-6.5mm, 6.5-8mm and 8-10mm for the filters, and for the other analyses between 250 and 425 μm . Following this, the biofilters were assembled as described below, the support layer with 5 cm gravel of between 0.1 and 1 cm in diameter, the active layer with a height of between 45 and 75 cm of cullet, with different diameters as described above, and the final layer of 5 cm of wood chips that will improve the uniform distribution of the inlet flow.

Finally, the biofilters were conditioned for one month and the following parameters were monitored twice a week for 3 consecutive months: COD, total nitrogen, total phosphorus, dissolved oxygen, total suspended solids, temperature and pH. From the results obtained in the biofilters, it was evident that a biofilm does indeed grow on the adsorbent material, which allows us to decontaminate domestic wastewater with maximum removal values of COD (97.04% in filter 2), nitrogen (62.22% in filter 6), total phosphorus (51.44% in filter 6) and TSS (88.75% in filter 6). 04% in filter 2), Nitrogen (62.22% in filter 6), Total Phosphorus (51.44% in filter 6), TSS (88.75% in filter 6), so it was determined that the best particle diameter for the creation of biofilters is 8-10mm and with a height of 75cm of oil palm shell.

Key words: biofilters, oil palm shell, artificial wastewater

1. INTRODUCCIÓN

Desde que el ser humano se asentó en diferentes localidades y surgieron las primeras comunidades, la disposición final de los todos los residuos producidos ha constituido un gran problema para las sociedades humanas, durante las últimas décadas el mundo ha tratado de resolver problemas relacionados con la disposición de residuos líquidos procedentes de diversas actividades. Los ríos, lagos, estuarios, acuíferos y el mar, han sido las masas receptoras de todos estos contaminantes, los cuales han sido incapaces de absorber y neutralizar la carga contaminante que los residuos imponen por lo que han ido perdiendo sus condiciones físicas, químicas y su capacidad para sustentar una vida acuática adecuada (García & Pérez, 2003).

Las aguas residuales son aquellas que, por el uso del ser humano, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y microorganismos. Existen diversos orígenes como: domésticas o aguas negras, aguas blancas, industriales y agrícolas (García & Pérez, 2003). Al ser una problemática a nivel mundial, se han desarrollado tecnologías convencionales y no convencionales para tratar estas aguas. Debido a que los sistemas de tratamiento convencionales son caros y/o difíciles de instalar y operar en los países en desarrollo, las aguas se descargan en los ecosistemas acuáticos (Vigueras-Cortés et al., 2013). Por esto, es mejor apuntar a opciones más baratas que son las tecnologías no convencionales, entre estas se hallan los procesos aplicados en tratamientos convencionales (sedimentación, precipitación química, degradación biológica, filtración, intercambio iónico, etc.) y en procesos propios de los tratamientos naturales (fotosíntesis, asimilación por parte de las plantas, fotooxidación, etc.) (Huertas & Marcos, 2013).

Existen diferentes tipos de materiales filtrantes orgánicos que pueden ser utilizados. La cáscara del núcleo de palma, un subproducto del procesamiento de la palma aceitera, se caracteriza por su aplicación en la construcción y los procesos de tratamiento de agua. Las propiedades físicas y químicas del cuesco determinadas utilizando métodos estándar, muestran que puede encontrar una aplicación útil en la construcción de materiales ligeros como material de relleno y como material adsorbente para el tratamiento de aguas industriales (Edmund, Christopher, & Pascal, 2014). El Ecuador ocupa el séptimo lugar en la lista de países productores de aceite de palma y productos derivados a nivel mundial (Ministerio de Comercio

Exterior, 2017). La producción de aceite de palma es de gran importancia para la economía nacional, ocupa una vasta extensión de terreno y a su vez genera una gran cantidad de residuos, se estima que anualmente se generan alrededor de 6 872 469 toneladas de residuos sólidos (Calderón, Andrade, Lizarzaburu, & Masache, 2017) entre los cuales encontramos raquis, fibras, cuesco, troncos, sólidos y aceites contenidos en efluentes líquidos.

Actualmente el cuesco de palmiste es usado como combustible sólido para el sector comercial e industrial en Ecuador (Heredia Salgado, Tarelho, Matos, Rivadeneira, & Narváez , 2019) pero hay muy pocos estudios sobre este material empleado como biofiltro, por lo que se desea contribuir con nuevo conocimiento acerca de los usos que se le puede dar al cuesco y a la vez obtener una solución que sea fácil de aplicar.

El trabajo se enfocará en el aprovechamiento de los residuos de cuesco de palmiste de la industria extractora de aceite de palma como material filtrante en un biofiltro que permitirá eliminar ciertos contaminantes de las aguas residuales. Se construirán 6 biofiltros a escala de laboratorio en donde se variará el diámetro de partícula desde 5 hasta 10 mm de diámetro y 2 tipos de altura, de 45 cm y 75 cm, con el fin de encontrar el biofiltro que tenga mayor eficiencia de remoción. Se emplearán aguas artificiales para las pruebas las cuales permitan simular condiciones de aguas residuales, pero sin carga de patógenos.

La búsqueda de usos alternativos y sostenibles de los residuos de la industria que extrae aceite de palma es un desafío, debido al gran volumen de generación de los mismos, es por eso que se ofrece una solución mediante el uso de los residuos como lo es el cuesco en biofiltros que depuran aguas residuales, pueden ser empleada en varias empresas como una tecnología que es realmente amigable con el medio ambiente.

1.1 Objetivo general

Estudiar un sistema de biofiltración a escala de laboratorio empleando como medio filtrante cuesco de palmiste para disminuir la carga contaminante en aguas residuales artificiales.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar la caracterización físico-química y el análisis proximal del cuesco de palmiste mediante normas ASTM y técnicas FTIR, MEB y Raman para conocer su influencia en el proceso de biofiltración.
2. Operar seis biofiltros que contengan diferentes tamaños de partícula y altura de cuesco para realizar pruebas de filtración con aguas residuales artificiales.
3. Determinar la eficiencia de eliminación de materia orgánica medida como DQO, SST, SSV y de nutrientes (N y P) de las aguas residuales artificiales para evaluar la eficiencia del sistema de biofiltración.
4. Analizar el biofilm de los biofiltros mediante SEM para establecer si existe alguna relación entre éste y los parámetros de operación del biofiltro.

1.3 Alcance

El presente trabajo tiene como último fin ofrecer una alternativa de bajo costo que permita depurar aguas residuales domésticas con un material orgánico generado por la industria extractora de aceite de palma, enfocándose particularmente en el cuesco. Esto se logra mediante la implementación de seis biofiltros en base a este material y el monitoreo de los mismos para determinar los porcentajes de eficiencia en la eliminación de los compuestos orgánicos medidos como DQO, SST, SSV y de nutrientes (N y P).

El proyecto fue ejecutado cinco fases:

1. Levantamiento de información sobre la industria extractora de aceite de palma en Ecuador especialmente en la zona de Santo Domingo – La Concordia por medio de revisión bibliográfica y visitas técnicas al lugar.
2. Preparación de la materia prima: la operación siguió los siguientes pasos: la recolección de las muestras de los residuos de cuesco de la zona de Santo Domingo – La Concordia, su selección, eliminación de impurezas, lavado, secado, tamizado y separación de las hojuelas de palmiste por diferentes tamaños.
3. Caracterización físico-química y el análisis proximal del cuesco de palmiste mediante normas ASTM y técnicas FTIR, MEB y Raman de la materia acondicionada: se realizó por

medio de ensayos de laboratorio para determinar la humedad de las muestras, densidades, porosidad, la cantidad de lignina, celulosa, hemicelulosa y extractivos.

4. Ensamblaje de los 6 biofiltros y operación de los mismos durante 4 meses: incluye monitoreos diarios de caudal, y análisis como: DQO, SST, SSV y de nutrientes (N y P).

5. Análisis posteriores del material al verse sometido a aguas residuales artificiales domésticas y evaluación de sus características al final de la operación de los biofiltros.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Aguas residuales

Según sostiene Romero (2022), “La generación de aguas residuales es un producto inevitable de la actividad humana” (p.16), se producen cuando sustancias no deseadas ingresan en ella alterando su calidad y usualmente son perjudiciales con la salud humana y para el medio ambiente (Haseena, 2017). Existen diversos orígenes como: domésticas o aguas negras, aguas blancas, industriales y agrícolas (García & Pérez, 2003). Según la FAO las aguas residuales son aguas que, debido a la mala calidad que presentan no puede volver a ser utilizadas, ni pueden ser desechadas por su peligrosidad. Cabe recalcar que, las aguas residuales de un usuario pueden ser de utilidad para otra persona en un diferente lugar.

Las aguas residuales contienen diversos productos químicos inorgánicos y orgánicos, metales tóxicos, productos químicos peligrosos, compuestos aromáticos, colorantes, etc. Estas sustancias nocivas tienen un gran potencial para contaminar los recursos naturales y pueden alterar su funcionamiento normal. Como resultado, las situaciones actuales exigen la restauración de los ecosistemas natural (Pratap et al., 2023).

Globalmente, se estima que alrededor del 24% de las aguas residuales que se generan en las industrias y en los hogares sigue un proceso de tratamiento antes de reutilización o descarga en cuerpos de agua (Pratap et al., 2023).

Al ser una problemática a nivel mundial, se han desarrollado tecnologías convencionales y no convencionales para tratar estas aguas. Debido a que los sistemas de tratamiento convencionales son caros y/o difíciles de instalar y operar en los países en desarrollo, las aguas se descargan en los ecosistemas acuáticos (Vigueras-Cortés et al., 2013). Por lo que

es mejor apuntar a opciones más baratas que son las tecnologías no convencionales, entre estas se hallan los procesos aplicados en tratamientos convencionales y en procesos propios de los tratamientos naturales (fotosíntesis, asimilación por parte de las plantas, fotooxidación, etc.) (Huertas & Marcos, 2013).

1.4.2 Generación y caracterización de las aguas residuales

La generación de residuos debido a las actividades del ser humano no se puede evitar. La cantidad y la calidad de las aguas residuales vienen determinadas por muchos factores. No todas las personas o las industrias producen la misma cantidad de desechos ya que varía por actividad. Cada hogar produce un agua residual tanto en la cantidad como en la calidad, varía el estilo de vida de los habitantes, el uso que le dan y por el marco técnico y jurídico en el que se desarrollan. En la mayoría de los hogares los residuos terminan como residuos sólidos y líquidos, aunque existen posibilidades de modificar las cantidades y la composición de los dos flujos de residuos generados. Para la industria se aplican consideraciones similares (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2008). Las aguas residuales de acuerdo con el lugar del que provienen presentan diferentes características físicas, químicas entre estas orgánicas, inorgánicas y gases, y características biológicas como se detalla en la Tabla 1. El presente estudio se basa en la descontaminación de aguas residuales domésticas artificiales que simulan los valores de las reales por lo que en la Tabla 2 se presenta la composición típica de las mismas para determinar si su concentración de contaminantes es alta, media o baja.

Tabla 1. Características de las aguas residuales y fuentes de origen

Características físicas	Fuente de origen
Sólidos	Suministro de agua, residuos industriales y domésticos
Temperatura	Residuos industriales y domésticos
Color	Residuos industriales y domésticos
Olor	Descomposición de residuos líquidos
Características químicas	
Orgánicos	
Proteínas	Residuos comerciales y domésticos
Carbohidratos	Residuos comerciales y domésticos
Aceites y grasas	Residuos comerciales, industriales y domésticos
Tensoactivos	Residuos industriales y domésticos
Fenoles	Residuos industriales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Inorgánicos	
pH,	Residuos industriales
Cloruros	Suministro de agua, residuos industriales e infiltraciones
Nitrógeno	Residuos agrícolas y domésticos
Fósforo	Residuos agrícolas, industriales y domésticos
Azufre	Suministro de agua y residuos industriales
Tóxicos	Residuos industriales
Metales pesados	Residuos industriales
Gases	
Oxígeno	Suministro de agua e infiltraciones
Hidrógeno sulfurado	Residuos domésticos
Metano	Residuos domésticos
Características biológicas	
Virus	Residuos domésticos
Bacterias	Residuos domésticos
Protozoarios	Residuos domésticos
Nematodos	Residuos domésticos

Fuente: (Romero, 2002).

Elaboración: Lomas, W.

Tabla 2. Composición típica de tres clases de aguas residuales domésticas

Constituyente	Concentración mg/l		
	Alto	Medio	Bajo
Sólidos totales	1200	700	350
Disueltos	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
En suspensión	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos sedimentables ml/l-h	20	10	5
DBO	300	200	100
DQO	570	380	190
Nitrógeno total (como N)	85	40	20
Orgánico (como N)	35	15	8
Amoniacal (como N)	50	25	12
Fósforo total (como P)	20	10	6
Cloruros (CL)	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50
Calcio (como Ca)	110	50	10
Magnesio (como Mg)	10	9	8
Sodio (como Na)	100	50	23

Fuente: (Romero, 2002).

Elaboración: Lomas, W.

Para entender las características de las aguas residuales, es conveniente cuantificar varios parámetros mediante análisis para determinar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En este trabajo identificaremos parámetros como: la demanda química de oxígeno (DQO), el nitrógeno total, fósforo total y los sólidos suspendidos totales que se encuentran en nuestras aguas residuales domésticas artificiales.

- a) Demanda química de oxígeno: “Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia, sea o no biodegradable, en medio ácido en presencia de catalizadores a una determinada temperatura y tiempo de reacción” (Muñoz & Aldás, 2017, p 21).
- b) Nutrientes: “Los principales nutrientes que contienen las aguas residuales domésticas son nitrógeno y fósforo. Estos elementos tienen especial importancia cuando son descargados en cuerpos hídricos con altos tiempos de retención (lagos, embalses, lagunas)” (Muñoz & Aldás, 2017, p 4).
- c) Materia orgánica: “Los sólidos suspendidos de un agua residual pueden contener un 75% de materia orgánica; los sólidos disueltos un 40%. La materia orgánica de las aguas residuales es una combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON) principalmente” (Romero, 2002, p 60).

1.4.3 Depuración de las aguas residuales

Los métodos para tratar las aguas residuales usualmente imitan los procesos naturales, biológicos, físicos y químicos. Las diferencias se basan en el tipo de tecnología a ser implementada y su magnitud, así como en las posibles combinaciones de tecnologías. A continuación, todos los procesos pueden definirse en términos de fisicoquímica, bioquímica (incluida la microbiología) y tiempo de duración del proceso. Los procesos también están divididos en función del tipo de cultivo microbiológico: en suspensión o fijo. Las tecnologías fijas (el cultivo crece sobre un material sólido) suelen ser más eficaces que las suspendidas. Las tecnologías en suspensión usualmente necesitan más energía para mantener el contacto entre los microorganismos y los nutrientes (Henze M, 2008).

Al estudiar los tratamientos que existen para descontaminar aguas residuales es importante entender los tipos de tecnologías aplicables a cada caso; es por ello que en la Tabla 3 se presenta una clasificación que conforme a la bibliografía se ha logrado establecer.

a) Tratamientos convencionales

Tabla 3. Tipos de tratamientos para descontaminar aguas residuales

Tipo	Tecnología	Observaciones
Físico	Sedimentación adicional	Lagunas de maduración, sedimentadores.
	Coagulación-floculación	Deben añadirse reactivos. La agitación es necesaria para una buena mezcla. Necesita una fase de sedimentación.
	Filtración	Tecnologías de membrana (nano y ultrafiltración, ósmosis inversa), amplios sistemas con materiales filtrantes (arena, materia orgánica, carbón, filtros multicapa...)
Químico	Tecnologías de biopelículas fijas (por ejemplo, humedales infiltración-percolación)	Transformación de nutrientes (principalmente formas de N), productos químicos y materia orgánica (en función de las condiciones redox)
Microbiológico	Lagunas de maduración	Al asentarse, las algas pueden crecer a gran velocidad.
	Sistemas extensivos (aparte de lagunaje)	Filtración superficial y en profundidad en sistemas con arena, suelo, sustrato. Papel activo de las biopelículas fijadas. Transformación de las formas de N en función de las condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias.
Sistemas combinados	MBR (Reactores Biológicos de membrana)	Combina un lodo activado clásico (reactor biológico) y en el mismo tanque una membrana para separar los flocúlos de fangos activados)

Fuente: (Henze M, 2008).

Elaboración: Lomas, W.

1.4.4 Biofiltración

Uno de los procesos para el tratamiento de agua y aguas residuales más importantes en la actualidad es la filtración. En el tratamiento de agua se la puede ocupar en: purificación de agua superficial para potabilizarla y en el tratamiento de aguas residuales con el fin de producir efluentes de buena calidad para que puedan ser reutilizados en otros fines, cualquier tipo de filtro que contenga un material orgánico que se adhiera al medio filtrante se lo puede denominar biofiltro. En un sistema de biofiltración, los contaminantes van disminuyendo su concentración o son eliminados debido a la degradación biológica a diferencia del filtro normal que solo es filtración física. En el proceso de biofiltración, los microorganismos se desarrollan

de manera paulatina en la superficie del medio filtrante y forman la biopelícula. El desarrollo de la biopelícula puede tomar varios días o meses dependiendo de la concentración de nutriente que tenga el afluente. El punto más importante para el correcto funcionamiento de un biofiltro es controlar y mantener una biomasa sana en la superficie del filtro. El rendimiento del biofiltro básicamente depende de las actividades microbianas que se desarrollan en la superficie del material, es precisa una fuente constante de sustratos (sustancia orgánica y nutrientes) para su funcionamiento constante y eficaz. Existen tres procesos biológicos que pueden suceder en un biofiltro, (i) adhesión de microorganismos, (ii) crecimiento de microorganismos y (iii) descomposición y desprendimiento de microorganismos. El éxito de un biofiltro depende del crecimiento y mantenimiento de los microorganismos (biomasa) en la superficie del medio filtrante (Chaudhary, Vigneswaran, Ngo, Shim, & Moon, 2003).

El funcionamiento económico y eficaz de un biofiltro depende de manera directa de las características de su medio filtrante. Al seleccionar el medio filtrante, también hay que tener en cuenta la fuente y la concentración de los contaminantes seleccionados. La eficacia del filtro viene establecida por las características físicas, como lo son: el tamaño del grano, la forma, la porosidad y la relación profundidad del lecho/granulometría del medio (Chaudhary et al., 2003).

Los biofiltros son una tecnología no tradicional que se ha venido empleando desde el siglo XVII para reducir la contaminación y de los riesgos sanitarios y de salud pública asociados a las aguas residuales (Torres, Rodríguez, & Uribe, 2003). Aunque la biofiltración es una técnica muy antigua, en la actualidad es atractiva ya que se pueden utilizar de nuevos materiales que reemplazan los medios tradicionales y que mejoran su competencia frente a otras alternativas de tratamiento (Arango Ruiz, 2004). Básicamente es un proceso en el que el mecanismo principal de remoción de contaminantes se basa en la adsorción y asimilación biológica en un soporte (Sosa Hernandez, 2015). Es una tecnología que se caracteriza por ser sencilla, ya que no requiere que se añadan nutrientes, coagulantes, floculantes u otros aditivos (Sosa Hernandez, 2015).

a) Principios de funcionamiento

En un sistema de biofiltración, los contaminantes se eliminan debido a la degradación biológica en lugar de por filtración física, como ocurre en un filtro normal (Chaudhary et al., 2003). Los biofiltros de flujo vertical eliminan contaminantes por vías como la adsorción y la biodegradación (Deng, Chen, & Chang, 2021).

- **Biopelícula:** Una biopelícula es una acumulación de microorganismos sobre una superficie. Dado que los microorganismos están adheridos a la superficie, el suministro de materia orgánica o sustrato (alimento) a los microorganismos de una biopelícula está controlado principalmente por los fenómenos de transporte por lo que se los puede lavar (Chaudhary et al., 2003).

b) Materiales filtrantes

Existen diferentes tipos de materiales filtrantes orgánicos que pueden ser utilizados. La cáscara del núcleo de palma, un subproducto del procesamiento de la palma aceitera se caracteriza por su aplicación en la construcción y los procesos de tratamiento de agua. Las propiedades físicas y químicas del cuesco determinadas utilizando métodos estándar, muestran que puede encontrar una aplicación útil en la construcción de materiales ligeros como material de relleno y como material adsorbente para el tratamiento de aguas industriales (Edmund et al., 2014). El Ecuador ocupa el séptimo lugar en la lista de países productores de aceite de palma y productos derivados a nivel mundial (Ministerio de Comercio Exterior, 2017). La producción de aceite de palma es de gran importancia para la economía nacional, ocupa una vasta extensión de terreno y a su vez genera una gran cantidad de residuos, se estima que anualmente se generan alrededor de 6 872 469 toneladas de residuos sólidos (Calderón et al., 2017) entre los cuales se puede encontrar raquis, fibras, cuesco, troncos, sólidos y aceites contenidos en efluentes líquidos (Chaudhary et al., 2003).

Tipos de materiales filtrantes

En los últimos años se ha probado con varios materiales filtrantes orgánicos para comprobar su eficiencia para tratar aguas residuales de distintos tipos. En la tabla 4 se puede apreciar algunos ejemplos de los cuales han sido utilizados.

Tabla 4. Eficiencias de remoción de materiales filtrantes orgánicos

Autores	Material filtrante orgánico	Tipo de influente	DBO5	DQO	SST	N-NTK	HH
			Remoción %				
Buelna et al. (2001)	Virutas de coníferas y turba	Sanitarias (sanitarias y lavabos)	96	–	99	90	
Garzón-Zúñiga y Buelna (2011)	Tabachin y jacaranda	Sanitarias (sanitarias y lavabos)	97	71	95	93	100
Batista et al. (2011)	Composta	Doméstica	65	60			
	Aserrin		71	80			
	Bagazo de caña		80	66			
Batista et al. (2013)	Composta	Doméstica			72		
	Aserrin				78		
	Bagazo de caña				86		
Viguera-Cortés et al. (2013)	Fibra de agave	Municipales	92	80	91		98

Fuente: (Sosa Hernandez, 2015).

Elaboración: Lomas, W.

1.4.5 Biofiltro de flujo libre

En los biofiltros de flujo libre, el agua fluye continuamente en forma parecida a la lluvia y el proceso que se desarrolla se lo realiza durante todo el ciclo a través del material orgánico filtrante. Además, los sistemas de flujo libre requieren una cierta altura, lo que a su vez provoca pérdidas hidráulicas de agua. Este biofiltro consume sustratos del biofilm en dos fases. (Muñoz & Aldás, 2017)

Fase A: transferencia externa para distribución uniforme del sustrato en el medio de soporte del biofilm.

Fase B: Las respuestas de consumo y difusión hacia el interior dependen del espesor de la biopelícula, por lo que se espera que la biopelícula sea lo más gruesa posible para un consumo óptimo.

Debido a que la eficiencia del tratamiento con biofiltros depende de la descomposición microbiana de compuesto volátiles orgánicos y del número y tipo de microorganismos presentes, es importante un período de acondicionamiento de (dos a tres semanas) para permitir que los microorganismos crezcan en el material y se adapten (Schmidt, Jacobson, & Nicolai, 2020).

1.4.6 Cuesco

La cáscara del palmiste es el endocarpio duro del fruto de la palma que es la semilla del árbol de palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Las cáscaras de almendra de palma se obtienen en trozos triturados después de trillar o triturar para eliminar la semilla de palma para la producción de aceite de almendra de palma (Akinwole, Olusegun, & Babatunde, 2014).

Durante el proceso de extracción por donde las nueces pasan por los molinos rompedores (ripple mill), que son máquinas que al momento de girar van rompiendo y liberando la almendra que se encuentra en el interior. Lo que se obtiene al final es una mezcla que consta de: almendras, cuesco, fibra y finos (mezcla triturada). Las hojuelas de cuesco y polvillo resultante del proceso se utilizan como combustible natural para la generación de vapor en calderas, pero también se los almacena o comercializa para otros usos (Ruiz-Delgado, 2022).

Los efluentes, el cuesco y los racimos de frutas vacíos se consideran desechos en el procesamiento de palma aceitera para producción de aceite, fibra de aceite de palma (Okoroigwe & Saffron, 2012).

En Ecuador se genera una gran cantidad de residuos de palma africana equivalente a 7 336 959 toneladas por año que se divide entre: raquis, fibra, cuesco y residuos de campo. Dentro de estos residuos, el cuesco de palma africana es relevante debido a la cantidad disponible (125.000 t/año) posee características físicas que lo vuelven atractivo como su poder calórico y similitud a un pellet producido de forma natural. El cuesco de palma africana en el Ecuador no tiene un uso claro y ha venido siendo usado mayoritariamente como agregado y cobertura para pisos (Heredia, 2017).

En un estudio anterior, Ogedengbe demostró que el cuesco, cuando es tratado y lavado adecuadamente, adsorbe el color y el sabor (entre otros) de las aguas extraídas de pozos poco profundos. En los centros rurales y urbanos de Nigeria, se trituraron y estudiaron como medios para filtros granulares. Posteriormente los restos en polvo se recogieron, se trataron con calor, se lavaron y estudiaron. Se encontró que el material tiene buenas capacidades de adsorción, especialmente cuando se mide en términos de eliminación de ácidos acéticos y hierro en solución. Los resultados del estudio indican que un filtro simple construido y cargado con las cáscaras de palmiste tratadas eliminaba el color y el sabor de las muestras de agua de pozo (Ogedengbe, Oriaje, & Tella, 1985).

a) Aplicaciones comunes e innovadoras

El uso y las aplicaciones industriales de la cáscara de nuez de palma se pueden clasificar en tres secciones principales: producción de energía/combustible, agregados para el refuerzo del hormigón y purificación del agua. La cáscara de nuez de palma también se ha carbonizado para producir carbón activado y biocarbón, que se han utilizado en agricultura, medicina, tratamiento de aguas y control de contaminantes. Las cenizas derivadas de la combustión completa de la cáscara de palmiste también se han aplicado a suelos agrícolas y de ingeniería para mejorar sus características. La ceniza también se ha utilizado como aditivo mineral en dietas para animales y como sustrato para cultivos y setas. Sin embargo, la mayor parte de la cáscara de nuez de palma se utiliza cada vez más como fuente de energía renovable por sus características de combustión superiores, su distribución uniforme de tamaños, su facilidad de manipulación y sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Okoli, 2020).

1.4.7 Espectroscopía FTIR

FTIR son las siglas de infrarrojos por transformada de Fourier. La espectroscopia IR nos indica la medición de la longitud de onda y la intensidad de la absorción de luz infrarroja por una muestra. La región IR vibracional (IR medio) comprende longitudes de onda en el rango de 2500 a 25000 nm, y las frecuencias o números de onda correspondientes van de 4000 a 400 cm^{-1} (Franca & Oliveira, 2011).

Cuando la radiación IR atraviesa una muestra, parte de la radiación es absorbida por la muestra y parte es transmitida. El espectro resultante (longitud de onda frente a intensidad).

Así como cada huella dactilar es única, no existen dos estructuras moleculares que generen el mismo espectro infrarrojo, lo que hace que esta técnica sea muy útil para una amplia variedad de análisis (Franca & Oliveira, 2011).

1.4.8 Espectroscopía Raman:

“La Espectroscopía Raman es una técnica espectroscópica molecular que usa la interacción de la luz con la materia para obtener información sobre la composición o las características de un material” (Toledo, 2023).

1.4.9 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido (MEB) es una herramienta que agrupa técnicas que permiten observar la caracterización morfológica, la composición y las estructuras de superficies sólidas mediante imágenes con diferentes resoluciones (Smith & Oatley, 2012).

2. METODOLOGÍA

2.1 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE ORGÁNICO

2.1.1 PREPARACIÓN DE MATERIAL

El residuo (cuesco) fue recolectado en una empresa extractora de aceite de palma ubicada en el kilómetro 34 de la vía La Concordia – Santo Domingo (figura 1), se recogieron 2 costales de cuesco que presentaban diferentes tamaños de partícula en diferentes lugares de la planta extractora en donde se encontraba el cuesco almacenado a la intemperie. Se almacenó el material en un lugar cubierto para prevenir humedad.



Figura 1. Empresa extractora, donde se obtuvo el cuesco de palmiste

Elaboración: Lomas, W.

La cáscara de la palma de aceite de secó al sol durante dos días consecutivos. Posteriormente se trituró y tamizó en diferentes rangos de tamaño de partícula, un diámetro aproximado de 5-6.5 mm, 6.5-8 mm y 8-10 mm para los filtros, y para los demás análisis entre 250 a 425 μm , utilizando una serie de tamices normalizados ASTM. Los tamices utilizados fueron; 7/16" (11,2 mm), 3/8" (9,5 mm), 5/16" (8 mm), 1/4" (6,3 mm), 3^{1/2}" (5,6 mm), 40 (425 μm), 60 (250 μm) y 100 (150 μm).

Las muestras tamizadas se lavaron en agua corriente y se sumergieron durante la noche en agua destilada hasta que la superficie de agua de remojo estuvo libre de aceite. Estos procesos de lavado y remojo tardaron cinco días en completarse. La cáscara de aceite de

palma limpia se secó en un horno marca ECOCELL modelo LSIS –B27/VC a 90°C durante 24 horas y se usó directamente en los filtros sin ningún otro tratamiento (Chong, Chia, & Ahmad, 2013).

2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL MATERIAL FILTRANTE MEDIANTE NORMAS TÉCNICAS ASTM

El cuesco de palmiste que se ocupó en los biofiltros como lecho filtrante fue caracterizado en los siguientes parámetros físicos: contenido de humedad, densidad real y aparente, porosidad, extractivos, lignina, hemicelulosa y celulosa.

a) CONTENIDO DE HUMEDAD

Para la obtención del contenido de humedad del cuesco de palmiste, se utilizó el Método A (secado en horno) establecido en la Norma **ASTM D 4442 – 20**, denominado “Métodos de prueba estándar para la medición directa del contenido de humedad de madera y materiales a base de madera”. Se realizaron 6 repeticiones.

Para el cálculo del contenido de humedad se aplicó la Ecuación 1:

$$\text{Humedad, \%} = \frac{(A - B)}{B} * 100$$

Ecuación 1. Contenido de humedad

Donde:

A = Masa de la muestra original, g

B = Masa de la muestra seca, g

b) DENSIDAD REAL Y APARENTE

Para determinar la densidad real del cuesco, se siguió el procedimiento descrito en la Norma **ASTM D 2320 – 98**, denominada “Método de prueba estándar para determinar la densidad de un sólido (Método del Picnómetro)”. Mientras que para la obtención de la densidad aparente se utilizó el método de la probeta.

Para el cálculo de la densidad se aplicó la Ecuación 2 y para el cálculo de la densidad real con corrección de temperatura se utilizó la Ecuación 3:

En la Tabla 5 se encuentra la densidad del agua a 25°C

$$Densidad = \frac{(W_3 - W_1)}{[(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)]} = \frac{W}{[W - (W_4 - W_2)]}$$

Ecuación 2. Densidad

Donde:

W = masa de muestra ($W_3 - W_1$)

W_1 = masa del picnómetro,

W_2 = masa del picnómetro lleno con agua a 25° C,

W_3 = masa del picnómetro con la muestra,

W_4 = masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua a 25° C

$$Densidad\ real = Densidad \times W_T$$

Ecuación 3. Densidad real con corrección

Donde:

W_T = densidad del agua a la temperatura de prueba en unidades deseadas

Tabla 5. Densidad del agua a 25 °C

T de prueba	Densidad del agua	
	g/cm ³	kg/m ³
25 °C	0.9970	997.0

Para el cálculo de la densidad aparente se aplicó la Ecuación 4:

$$Da = \frac{W_{pr+m} - W_{pr}}{V_{pr}}$$

Ecuación 4. Densidad aparente

Donde:

W_{pr+m} = masa de la probeta con la muestra, g

W_{pr} = masa de la probeta vacía, g

V_{pr} = volumen de la probeta, ml

c) POROSIDAD

Para determinar la porosidad se empleó la relación que existe entre la densidad real y la densidad aparente. Puesto que el volumen aparente siempre será superior al volumen real, la densidad real siempre será mayor que la densidad aparente.

Para el cálculo de la densidad aparente se aplicó la Ecuación 5:

$$\varepsilon, \% = \frac{\rho_{real} - \delta_{aparente}}{\rho_{real}} * 100$$

Ecuación 5. Porosidad

Donde:

ρ_{real} = densidad real

$\rho_{aparente}$ = densidad aparente

d) EXTRACTIVOS

Para determinar el contenido de extractivos en solución de etanol-tolueno, se utilizó el procedimiento descrito en la norma **ASTM D 1107 – 96**, denominada “Método de prueba estándar para la solubilidad en etanol-tolueno de la madera” cuyo objetivo es medir el contenido de: ceras, grasas, resinas, aceites, taninos y ciertos componentes que en éter son insolubles.

Para el cálculo de contenido de extractivos se aplicó la Ecuación 6:

$$\%Extractivos = \left(\frac{W_2}{W_1 - P} \right) * 100$$

Ecuación 6. Extractivos

Donde:

W_2 = Peso final muestra, g

W_1 = Peso inicial de la muestra seca, g

P = Proporción de madera sin humedad (1 - Humedad)

e) LIGNINA

Para determinar el contenido de lignina de cuesco, se siguió el procedimiento descrito en la norma **ASTM D 1106 – 96**, denominado “Método de prueba estándar para la lignina insoluble en ácido de maderas”.

Para el cálculo de lignina se aplicó la Ecuación 7:

$$Lignina, \% = \left(\frac{W_f - W_i}{W_{im} * (1 - Humedad)} \right) * 100$$

Ecuación 7. Lignina

Donde:

W_f = Peso final del filtro y la muestra, g

W_i = Peso del filtro, g

W_{im} = Peso inicial de la muestra

f) HEMICELULOSA Y CELULOSA

El contenido de hemicelulosa fue determinado mediante la extracción con una solución álcali, método establecido en la norma **ASTM D 1109 – 84**, denominado “Método de prueba estándar para la determinación de la solubilidad de la madera en hidróxido de sodio (1%)”. Mientras que la determinación del contenido de celulosa se calculó mediante la diferencia de la celulosa, extractivos y lignina.

Para el cálculo de hemicelulosa se aplicó la Ecuación 8:

$$\text{Hemicelulosa, \%} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} * 100$$

Ecuación 8. Hemicelulosa

Donde:

W_1 = Peso de la muestra seca antes de la prueba, g

W_2 = Peso de la muestra seca después del tratamiento con la solución de NaOH, g

g) BIOPELÍCULA

Para el cálculo de la biopelícula se tomaron 3 muestras de un mismo filtro, se las lavó con agua destilada. Se colca en una probeta y se agita a 600 RPM durante 10 minutos, concluido el tiempo se filtra y se pesa el filtro.

Además, se mandaron diferentes muestras de cuesco para ser analizadas en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) ubicado en la Escuela Politécnica Nacional para conocer su composición y morfología, de acuerdo a lo reportado se siguieron los siguientes procedimientos:

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las micrografías fueron adquiridas con las siguientes condiciones:

- Voltaje de aceleración: 20 Kv
- Distancia de trabajo: 18,2 mm
- Filamento: 65.3 %
- Emisión de corriente: 131,8 μ A
- Presión de vacío: $2,6 \times 10^{-5}$ Torr
- Magnificaciones: 25X, 250X, 500X y 1000X

Espectroscopía Raman

Para el análisis de las muestras se utilizaron las siguientes condiciones:

- Longitud de onda del láser utilizado: 532 nm
- Rejilla de difracción utilizada: 1800 gr/nm
- Potencia del láser: 50 Mw
- Potencia del láser filtrada y utilizada: 3,2 %
- Apertura confocal: 200 μ m
- Lente objetiva utilizada: 50X – LWD
- Rango del número de onda utilizado: 300 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}
- Resolución espectral: 0.35 cm^{-1}
- Tiempo de adquisición: 10 s
- Acumulaciones: 16

Para el análisis de FTIR, se envió una muestra de cuesco con tamaño de partícula de 0.15 mm que pasó por tamiz malla N° 100 al Centro de Investigación y Control Ambiental (CIAP) de acuerdo a lo requerido por el analista. Se realizaron los análisis del cuesco limpio y del cuesco del biofiltro 6.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES A TRATAR

2.3.1 AGUAS RESIDUAL ARTIFICIAL DOMÉSTICA

En este trabajo el sistema constituido por 6 biofiltros fue alimentado por agua residual doméstica artificial preparada en el laboratorio todos los días para evitar cambios en la materia orgánica. (Almeida-Naranjo, Espinoza-Montero, Muñoz-Rodríguez, & Villamar-Ayala, 2017). Su composición se detalla en la tabla 6. Todos los componentes se disolvieron en 500 ml de agua potable y se aforaron en 20 L que se encuentran en un tanque que alimenta los 6 biofiltros.

Tabla 6. Composición del agua artificial

Gelatina	34 mg/L
Almidón	100 mg/L
Azúcar	171 mg/L
Leche en polvo	200 mg/L
Jabón	3 mg/L
Fosfato ácido de potasio	44.5 mg/L
Bicarbonato de sodio	150 mg/L
Sulfato de amonio	74.2 mg/L
Sulfato de magnesio	3.0 mg/L

Fuente: Lomas, W.

El afluente y el efluente de los biofiltros fueron caracterizados químicamente con respecto al contenido de: Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (SST), Sólidos disueltos totales (SDT), Nitrógeno total (NT), Fósforo total (FT), Oxígeno Disuelto (OD), temperatura (T) y potencial de hidrógeno (pH).

Demanda química de oxígeno: Para determinar la DQO se siguió el método del Digestor Hatch para DQO descrita en APHA 5220 D con ayuda del espectrofotómetro HACH DR2700, equipo que se encuentra en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA), se tomó una muestra el día lunes y jueves por la mañana en un frasco estéril y se procedió de la siguiente forma:

- Homogeneizar la muestra.
- Precaentar el digestor de DQO a 150°C.
- Tomar 8 viales, uno para blanco, uno para el afluente y 6 de los efluentes de los biofiltros.
- Colocar 2 ml de muestra en un vial para DQO.
- Colocar 2 ml de agua destilada en otro vial para DQO (vial de calibración).
- Tapar todos los viales y colocarlos en el digestor precalentado durante dos horas a 150°C. Enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Medir la DQO en cada uno de los viales, utilizando el espectrofotómetro. Realizar la lectura de concentración de DQO en el espectrofotómetro en rango 420 nm.

Sólidos suspendidos totales: Para la determinación de los SST, se tomaban 8 muestras los días miércoles, en la mañana se preparaba el afluente y se tomaba una muestra fresca del agua residual artificial, en 6 frascos estériles se muestreaba el efluente de los 6 biofiltros y se llevaba a laboratorio para ser analizadas de inmediato. Para fines del análisis se utilizó la metodología descrita en **APHA 2540 D** y se obtuvieron 17 datos, ya que se monitoreó el sistema durante 17 semanas consecutivas.

Sólidos disueltos totales: Para la determinación de los SST, se tomaban 8 muestras los días miércoles, en la mañana se preparaba el afluente y se tomaba una muestra fresca del agua residual artificial, en 6 frascos estériles se muestreaba el efluente de los 6 biofiltros y se llevaba a laboratorio para ser analizadas de inmediato. Para fines del análisis se utilizó la metodología descrita en **APHA 2540 E** y se obtuvieron 17 datos, ya que se monitoreó el sistema durante 17 semanas consecutivas.

Nitrógeno total: Para la determinación del NT se utilizó el Método **HACH 10071**. Se ocupaban 8 viales semanales, uno para el blanco, uno para el afluente y 6 para los efluentes de los biofiltros. Se obtuvieron 13 datos, ya que se monitoreó el sistema durante 3 meses y no se tomó en cuenta el periodo de acondicionamiento.

Fósforo total: Para la determinación del FT se utilizó el Método **HACH 10127**. Se ocupaban 8 viales semanales, uno para el blanco, uno para el afluente y 6 para los efluentes de los biofiltros. Se obtuvieron 13 datos, ya que se monitoreó el sistema durante 3 meses y no se tomó en cuenta el periodo de acondicionamiento.

El Oxígeno disuelto, pH y la temperatura: para la medición de estos parámetros se ocupó el Multímetro portátil HQ30D, se midió directamente del tanque en donde se preparaba el agua residual artificial y de los frascos estériles que contenían los efluentes de la operación de los 6 biofiltros mediante el multímetro portátil de la siguiente forma: al inicio se lavó el electrodo con agua destilada y se lo secaba, una vez seco se sumergió por completo dentro de las muestras y se esperó que se estabilice por al menos unos 2 minutos, al sacarlo se lavó y se repetía el proceso con cada muestra. Se registraron los datos que reflejaba el equipo. Todos los ensayos de laboratorio se realizaron en las instalaciones del Centro de Investigación aplicada a polímeros (CIAP) y en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la Escuela Politécnica Nacional. Un resumen de los parámetros efectuados se describe en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización del afluente

Agua residual artificial doméstica		
	Norma/procedimiento	Fotografía
DQO (mg/L)	Método del Digestor Hach	
SST (mg/L)	APHA 2540 D	
SDT (mg/L)	APHA 2540 E	
Nitrógeno total (mg/L)	Método 10071	

Fósforo total (mg/L)	Método 10127	
Oxígeno Disuelto (mg/L)	Multímetro portátil HQ30D	
Temperatura (°C)	Multímetro portátil HQ30D	
pH	Multímetro portátil HQ30D	

Fuente: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

Elaboración: Lomas, W.

2.4 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN

2.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA EXPERIMENTAL

Se construyeron seis biofiltros a escala de laboratorio de flujo libre que fueron alimentados por un tanque central de distribución. El sistema de biofiltración se instaló y operó en el Laboratorio Docente de Hidráulica, edificio N°10, ubicado en la Escuela Politécnica Nacional como se puede apreciar en la Figura 2. Los biofiltros se operaron durante 4 meses.



Figura 2. Tanque de distribución y sistema de biofiltración
Elaboración: Lomas, W.

2.4.2 ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

El sistema de biofiltración constó con seis biofiltros a flujo libre, usando como medio filtrante cuesco de palmiste con diferente altura y diferentes tamaños de partícula. Las aguas se alimentaron a un tanque que se encontraba en una estructura metálica alta y que por gravedad alimentaba al sistema de biofiltración partiendo de un tanque de distribución que repartía el caudal para los 6 biofiltros con una carga hidráulica superficial de $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}^1$ (Córdor, 2019), que representa un volumen de agua a tratar por metro cuadrado de superficie y por unidad de tiempo. Los biofiltros fueron contruidos con botellas PET recicladas de 1.35 litros, las cuales fueron sobrepuestas de forma vertical hasta conseguir una altura entre 0.6 y 0.9 m (Gauss, Cáceres, & Fong, 2004). Los biofiltros estuvieron conformados por tres capas. La capa de soporte con 5 cm grava de entre 0.1 y 1 cm de diámetro (Gauss et al., 2004). La capa activa con una altura entre 45 y 75 cm de cuesco, con diferentes diámetros descritos anteriormente, que ayudará al desarrollo de microorganismos y la capa final de 5 cm de viruta que mejorará la distribución uniforme del caudal de entrada.

2.4.3 ACONDICIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS

Se acondicionaron los biofiltros con aguas residuales reales tomadas del río Machángara. A estas aguas se las almacenó en un tanque con aireación de 24 horas durante cuatro semanas, se alimentó las aguas 2 veces a la semana con 3 gramos de azúcar en 100 ml de agua para mantener a los microorganismos presentes. Una vez finalizó el periodo de maduración de las aguas residuales, se llenaron los filtros y se dejó durante un período de una semana. Se colocó 1 L de agua madura en los filtros pequeños que tienen una altura total de 55 cm que son los biofiltros 1,3 y 5 y 2 L en los filtros grandes que tienen una altura total de 85 cm y son los biofiltros 2,4 y 6 presentados en la Figura 3 y la Tabla 8 presentadas a continuación, previo a pasar las aguas residuales artificiales se vaciaron los filtros.



Figura 3. Alturas de los biofiltros
Elaboración: Lomas, W.

Tabla 8. Composición de los biofiltros

	Biofiltros cuesco					
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4	Filtro 5	Filtro 6
Diámetro de partícula	5-6.5 mm		6.5-8 mm		8-10 mm	
Grava	5	5	5	5	5	5
Cuesco	45	75	45	75	45	75
Viruta	5	5	5	5	5	5
Altura final (cm)	55	85	55	85	55	85

Elaboración: Lomas, W.

2.4.4 MONITOREO DE LOS BIOFILTROS

El periodo de monitoreo de los biofiltros se efectuó en un periodo de 4 meses, distribuidos entre 1 mes de acondicionamiento y 3 meses de biofiltración. Se realizó de la siguiente manera: se controló DQO dos veces por semana los días lunes y jueves y los parámetros de nutrientes (nitrógeno y fósforo), SST, pH, T y OD una vez por semana. Se monitorearon los biofiltros por un período de 17 semanas. Los filtros operaron 8 horas al día durante 5 días a la semana, los sábados y domingos pasaron inactivos. En la tabla 9 presentada a continuación se aprecian los parámetros analizados y la periodicidad de los mismos.

Tabla 9. Periodicidad del monitoreo

Parámetro	Periodicidad
Demanda química de oxígeno	2 veces por semana
Nitrógeno Total	Semanal
Fósforo Total	Semanal
Sólidos suspendidos totales	Semanal
Oxígeno Disuelto	Semanal
Potencial Hidrógeno	Semanal

Elaboración: Lomas, W.

2.4.5 EVALUACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN

El porcentaje de eficiencia de los biofiltros se evaluó mediante la colocación de dos puntos de muestreo: uno al inicio del tanque de distribución de aguas residuales domésticas artificiales y otro en la salida de cada biofiltro. Se realizaron 3 mediciones semanales de los filtros, los días lunes, miércoles y viernes en donde se evaluaron los siguientes parámetros: DQO, SST, SDT, NT, FT, T, OD y pH.

Para determinar el porcentaje de remoción de cada parámetro previamente mencionado en la salida de los biofiltros, se empleó la ecuación 9 como se indica a continuación

$$\%Eficiencia\ de\ Remoción = \left(1 - \frac{S}{E}\right) * 100$$

Ecuación 9. Eficiencia de remoción

En donde:

E: Concentración de entrada del parámetro medido del biofiltro

S: Concentración de salida del parámetro medido del biofiltro

Todos los resultados que se obtuvieron se organizaron en tablas y gráficos para poder comprenderlos e interpretarlos de una manera más sencilla.

La evaluación estadística de los datos se lo realizó mediante el análisis de la varianza (ANOVA) en donde se compararon las variables estudiadas, tanto la influencia del tamaño de partícula del material filtrante como la altura del lecho en los biofiltros.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE

1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA MEDIANTE NORMAS TÉCNICAS ASTM

La cáscara de nuez de palma o cuesco se ha descrito como un pellet natural de propiedades únicas que lo hacen útil para diferentes aplicaciones. Se ha informado de que el nivel de pulverización de la cáscara influye en el volumen, el área superficial, el tamaño de las partículas, la distribución del tamaño de los poros y otras propiedades, así como en la morfología de la cáscara (Okoli, 2020). En la tabla 10 se muestra las características físicas del cuesco y en la Tabla 11 la composición proximal y el análisis químico de la cáscara de nuez de palma.

Tabla 10. Características físicas del cuesco

	Obtenido	Bibliografía	
Humedad (%)	8,80	8 – 15	(Johnson Alengaram, Al Muhit, bin Jumaat, & Jing, 2013)
Densidad real (kg/m ³)	1,382	1,381	(Arzola, Gómez, & Rincón, 2012)
Densidad aparente (kg/m ³)	1.278	1.208	(Arzola et al., 2012)
Densidad compactada	613	612 – 670	(Yew, Bin Mahmud, Ang, & Yew, 2014)
Porosidad	7.47	3.9 – 13	(Arzola et al., 2012)

Elaboración: Lomas, W.

De acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente y a la bibliografía consultada de las propiedades físicas y químicas del cuesco de palmiste, se puede observar que los resultados corresponden a la especie de palma (*Elaeis guineensis*) una de las especies más cultivadas incluyendo 42 países y 11 millones de hectáreas a nivel mundial (Shinoj, Visvanathan,

Panigrahi, & Kochubabu, 2011) que es la que se encuentra en Ecuador, tanto en la costa como en el oriente. Sus propiedades han sido grandemente estudiadas, ya que lo han venido ocupando en producción de energía, agregados para el refuerzo del hormigón y purificación del agua (Okoli, 2020).

Tabla 11. Características químicas del cuesco

	Obtenido	Bibliografía	
Extractivos (%)	2.972	3.0	(Nabinejad, Sujan, Rahman, & Davies, 2015)
Lignina (%)	48.94	53.85	(Edmund et al., 2014)
Hemicelulosa (%)	23,129	22,1	(Nabinejad et al., 2015)
Celulosa (%)	24.959	26.92	(Edmund et al., 2014)

Elaboración: Lomas, W.

Es un material fibroso compuesto principalmente de lignina (48.94%) y hemicelulosa (23.129%). Su contenido de humedad oscila entre el 8% y el 15%, y su densidad aparente es apreciable. El contenido de lignina del 49% es significativamente superior al de otros residuos de cáscara, como la cáscara de coco 29.4% (Markovičová & Zatkaličková, 2016). Una comparación entre la fibra de palmiste, compost de fibra de palmiste, viruta de madera y cuesco, indica que aunque todos mostraron ser materiales óptimos para ser usados en procesos de biofiltración, de acuerdo a la densidad y la porosidad la cáscara de nuez de palma presenta los mejores parámetros (Rahmat, Qamaruz Zamana, & Azan Tajarudin, 2017).

2. ANÁLISIS MEDIANTE TÉCNICAS INSTRUMENTALES

ESPECTROSCOPIA FTIR

La muestra de cuesco original fue analizada en el Centro de Investigación aplicada a polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4. En la figura 5 se observa el análisis FTIR de una muestra de cuesco del filtro 6 al final de la operación de los biofiltros

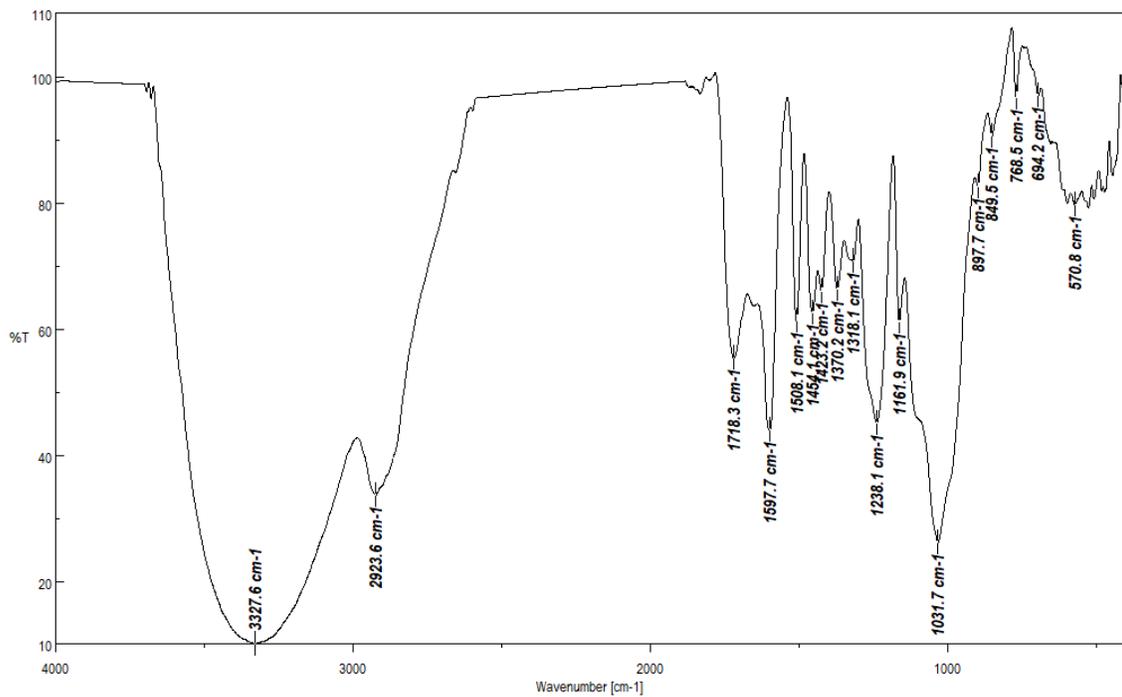


Figura 4. Espectroscopía FTIR del cuesco de palmiste original

Elaboración: Lomas, W.

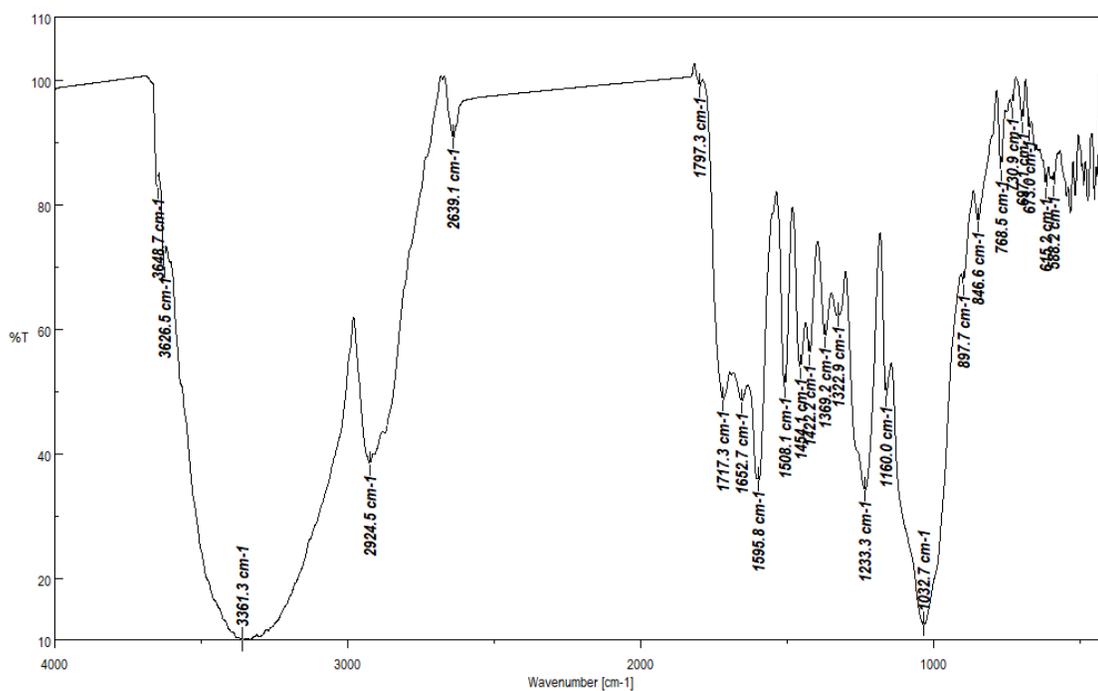


Figura 5. Espectroscopía FTIR del cuscó de palmiste del filtro 6 al final de la operación

Elaboración: Lomas, W.

El espectro FTIR del polvo de cáscara de fruto de aceite de palma sin tratar mostró las siguientes bandas: 3327 cm^{-1} (vibraciones de estiramiento O-H), 2923 cm^{-1} (vibraciones de estiramiento C-C), 1597 cm^{-1} (vibración de estiramiento C=C en anillos aromáticos) y 1031.7 cm^{-1} (vibraciones de estiramiento C-OH). Se observó la presencia de enlaces O-H y C-O propios de los materiales carbonosos, vibraciones de cetonas, y anillos aromáticos. Como en otros refuerzos naturales se espera que el grupo hidroxilo desempeñe un papel crucial en la adsorción de la humedad en la superficie del material. La misma adsorción puede producir una adhesión en la biopelícula del material (Nabinejad et al., 2015). Se observó un cambio en la estructura al comparar el material inicial con el material al final de la operación de los biofiltros, el material sufre una degradación en la estructura con el paso del tiempo (Dan, Hashim, Raj, Huddin, & Hussain, 2018).

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB-SEM)

Las imágenes SEM que se muestran en la figura 6 son la morfología que revela la estructura heterogénea del cuesco original de palma aceitera. Indican que la muestra está formada por microporos por los cuales probablemente intercambia aire y líquidos con las capas externas para mantener su vida. La forma de los materiales de la biomasa es una propiedad importante en el diseño y funcionamiento de reactores (Okoroigwe & Saffron, 2012)

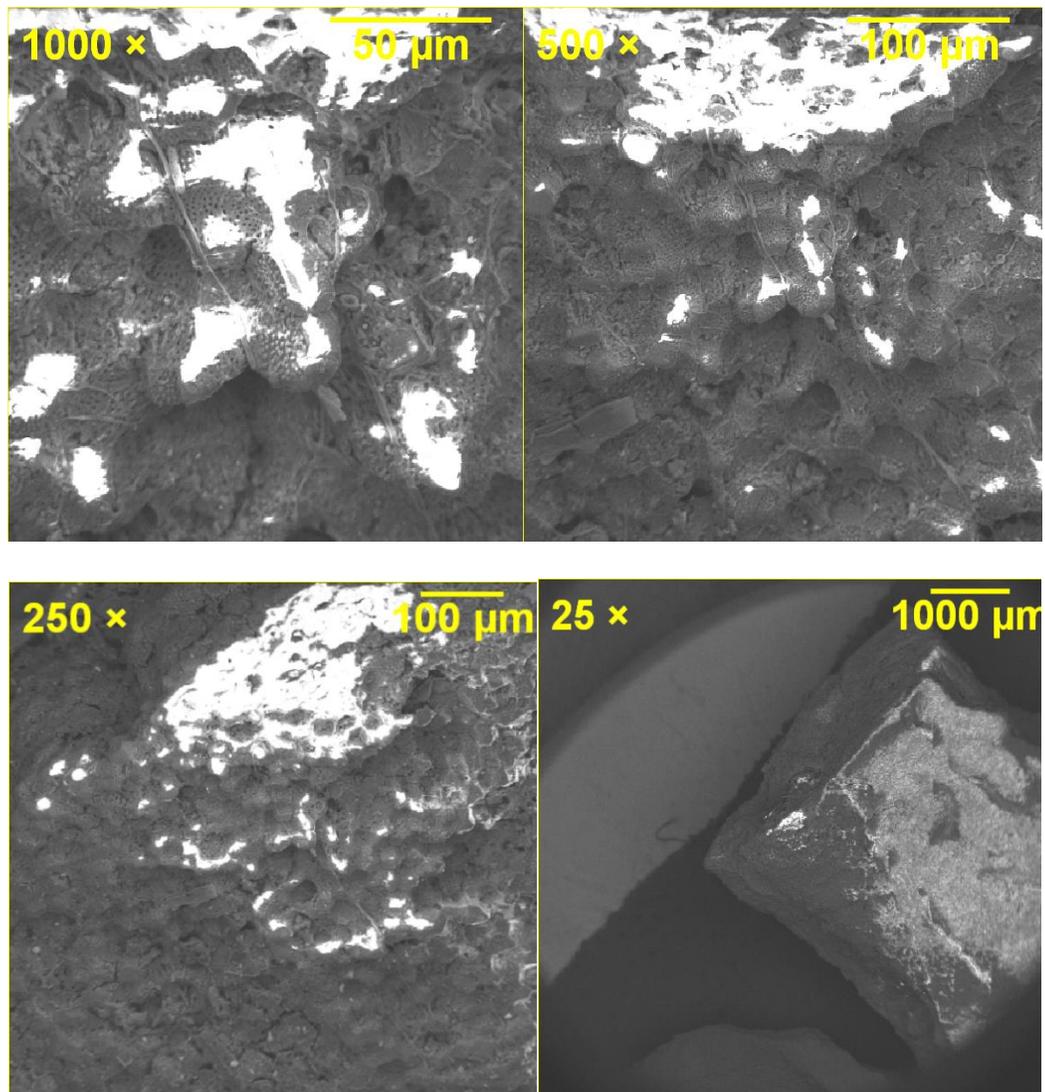


Figura 6. Imagen SEM del cuesco de palmiste original

Fuente: (LANUM, 2023)

La nuez de palma aceitera es dura y tenaz, similar a la fibra de coco. La imagen del microscopio electrónico de barrido (SEM) indica la sección transversal del cuesco una estructura irregular rodeada de estructuras tubulares porosas. Los poros de la superficie del cuesco tienen un diámetro medio de $0,07 \mu\text{m}$ (Shinoj et al., 2011). También se puede observar la presencia de impurezas en la superficie que se atribuyen a materiales aceitosos y cerosos remanentes del proceso de extracción del aceite (Nabinejad et al., 2015).

Esta morfología porosa de la superficie es útil para una mejor interacción mecánica con la resina matriz en la fabricación de agregados. Sin embargo, la estructura porosa de la superficie también facilita la penetración de agua en la fibra por capilaridad, especialmente cuando se expone al agua (Okoli, 2020).

ESPECTROSCOPIA RAMAN

En la figura 7 se presenta el espectro Raman de la muestra “Cuesco” (MI-20-0670) y en la figura 8 el espectro Raman del filtro 6 al final de la operación.

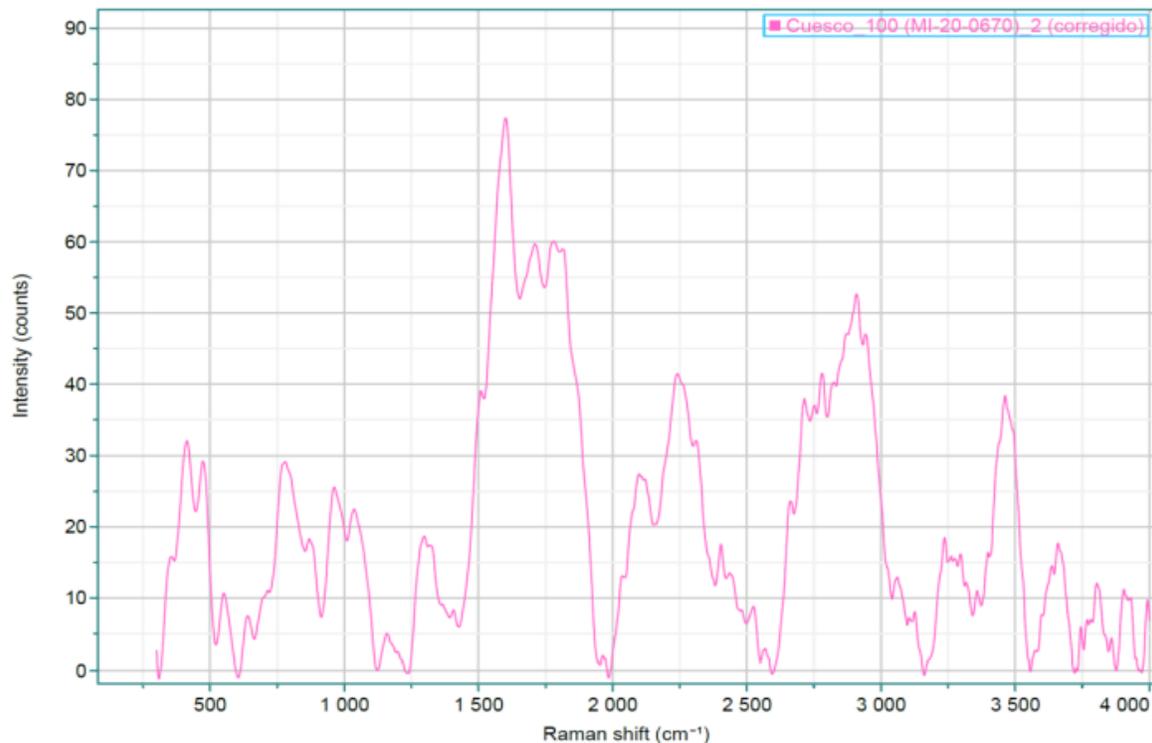


Figura 7. Espectroscopía Raman del cuesco limpio

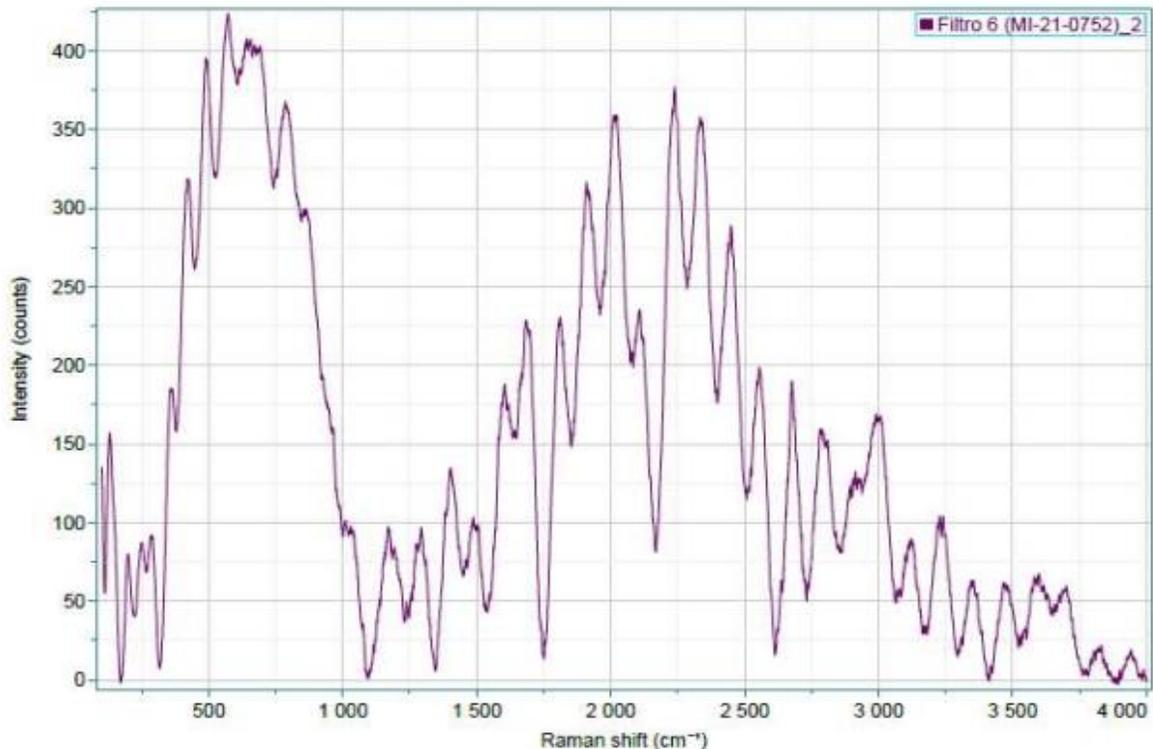


Figura 8. Espectroscopía Raman final de operaciones filtro 6

Al ser la Espectroscopía Raman una de las técnicas más usadas para caracterizar la estructura de los enlaces entre materiales carbonosos (Nasir, Hussein, Yusof, & Zainal, 2017) y a partir de las mediciones que se le realizó al cuesco sin tratar y al cuesco del filtro 6 al final de la operación se evidencia que existen modificaciones en las longitudes de onda o desplazamientos notables entre los 500cm^{-1} a los 1007cm^{-1} que se identifican como compuestos químicos de la familia de los carotenoides debido a la degradación de material orgánico con el pasar el tiempo en los biofiltros. Existen picos significativos entre 1500cm^{-1} y 2500cm^{-1} en donde se encuentran vibraciones moleculares en los que se identifica los cambios del material antes y después de su uso (Dan, Hashim, Raj, Huddin, & Hussain, 2018).

3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES A TRATAR

PARÁMETROS INICIALES

Para la determinación de los parámetros iniciales se hacía el muestreo del agua residual preparada en el laboratorio, una vez a la semana y se calcularon los promedios para este fin. Los valores son presentados a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros iniciales de las aguas residuales artificiales

Parámetro	Unidad	Valores promedio
DQO	(mg/L)	634 ± 14
SST	(mg/L)	132.7 ± 26.7
Nitrógeno total	(mg/L)	20.5 ± 0.4
Fósforo total	(mg/L)	11.9 ± 2.9
Oxígeno Disuelto	(mg/L)	5.7 ± 0.8
Temperatura	(°C)	16.8 ± 0.3
pH		6.5 ± 0.3

Elaboración: Lomas, W.

De acuerdo a la evaluación de los parámetros iniciales, se obtuvo un valor de DQO de 634 mg/L que comparado a la Tabla 2 de este documento que es la composición típica de las aguas residuales nos ubica en el rango alto, mientras que para los SST con un valor de 132.7 mg/L está en rango bajo, nitrógeno total con un valor de 20.5 está en rango bajo, fósforo total con un valor de 11.9 está en rango medio, permite analizar que se maneja un agua residual doméstica de concentración baja en casi todos los parámetros ya que el parámetro más alto que se tiene aquí en la DQO con un valor de 634 mg/L pero eso es debido a los materiales que se ocuparon para preparar el agua residual artificial doméstica ya que ese era el valor esperado según (Almeida-Naranjo et al., 2017).

3.1.3 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN

REMOCIÓN DE DQO

La concentración de la DQO del afluente se mantuvo con un promedio de 634 m/L diaria, al observar la Figura 9 se puede apreciar que durante las 4 primeras semanas de monitoreo el porcentaje de remoción es bajo debido a que se encontraba en periodo de acondicionamiento y estaba alimentado con aguas residuales domésticas tomadas en un punto bajo del río Machángara. Una vez culminado el acondicionamiento se puede notar que desde la semana 5 hasta la semana 10 de monitoreo los porcentajes de remoción de todos los filtros superan el 95% lo que indica que está funcionando. A partir de la semana 11 hasta la 17 los porcentajes empiezan a cambiar ya que empezaron a aparecer mosquitos y gusanos dentro de las estructuras. Estos vectores empezaron a aparecer ya que el sistema de biofiltros no contaba con una tapa que cubra la entrada del caudal y estos mosquitos empezaron a ser atraídos por la preparación de las aguas sintéticas ya que contenían ingredientes como leche en polvo, gelatina y azúcar.

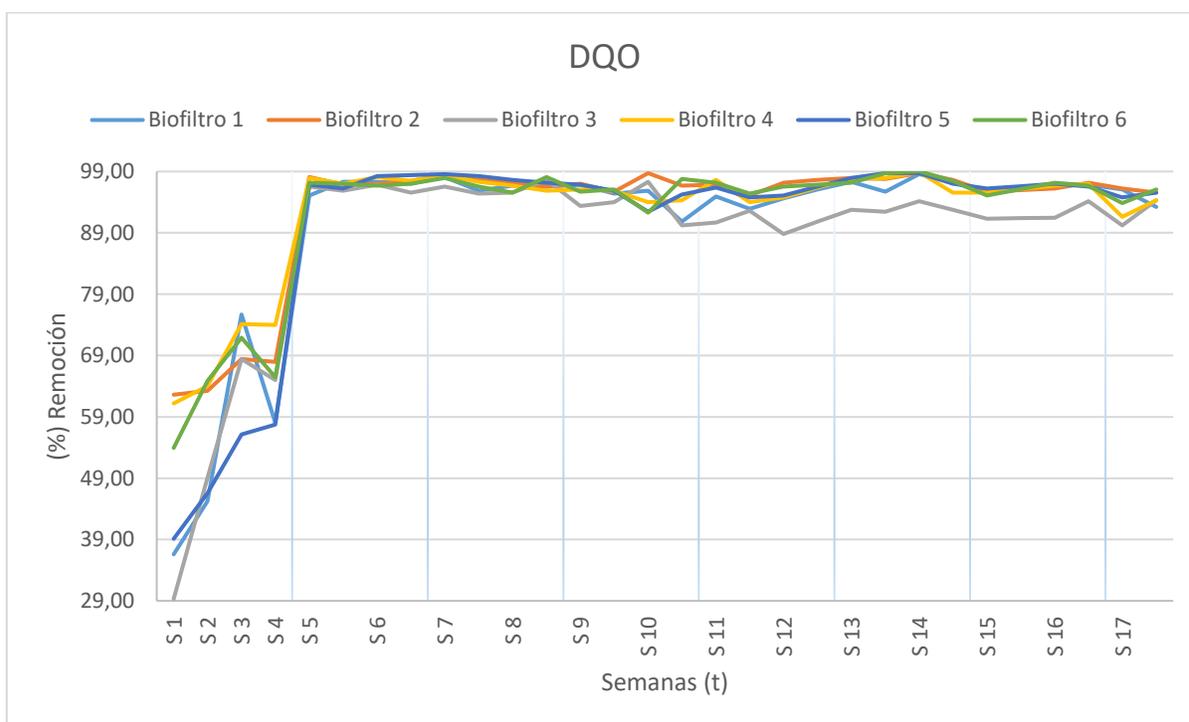


Figura 9. Porcentaje de remoción de la DQO durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo

Elaboración: Lomas, W.

Los porcentajes de remoción de DQO se pueden observar en la Figura 10 y en la Tabla 13 los valores promedio de los mismos desde la semana 5 hasta la semana 17. La remoción promedio que se obtuvo del monitoreo de los 6 filtros es de 91.10%, siendo el que más removió el B2 de altura de cuesco de 75 cm y tamaño de partícula de 5-6.5 mm con un 97.04%, seguido del B5 (96.59%) y B6 (96.59). El análisis de varianza ANOVA reveló que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tamaños de partícula del material filtrante. Mientras que los biofiltros con menor porcentaje de remoción fueron el B3 (93.57%) y el B1 (95.96%) lo que indica que el tamaño de partícula más pequeño y la altura del lecho filtrante sí importa al momento de la filtración. De acuerdo con los resultados obtenidos y al compararlo con otros materiales filtrantes orgánicos, el cuesco de palmiste supera a la composta (60%), tabachin y jacaranda (71%), aserrín (80%), bagazo de caña (66%) y fibra de agave (80%) en remoción de DQO como se presentó en la Tabla 4. La cáscara de coco como medio orgánico filtrante presenta un porcentaje de remoción del 80% (Syakila Nasaruddin & Maya Saphira Radin Mohamed, 2021).

Durante el periodo de monitoreo del porcentaje de remoción de la DQO, se puede observar cómo empieza a disminuir la eficiencia a partir de la semana 9 cuando los filtros habían permanecidos estables durante 4 semanas, la figura 9 es una ampliación del comportamiento de los biofiltros en las 17 semanas de monitoreo. En la tabla 13 se puede apreciar un resumen de la eficiencia de remoción de DQO de los biofiltros durante todo el periodo monitoreado. En la tabla 14 se encuentra el análisis de la varianza ANOVA de los filtros 2,4 y 6 con altura de lecho de 75 cm.

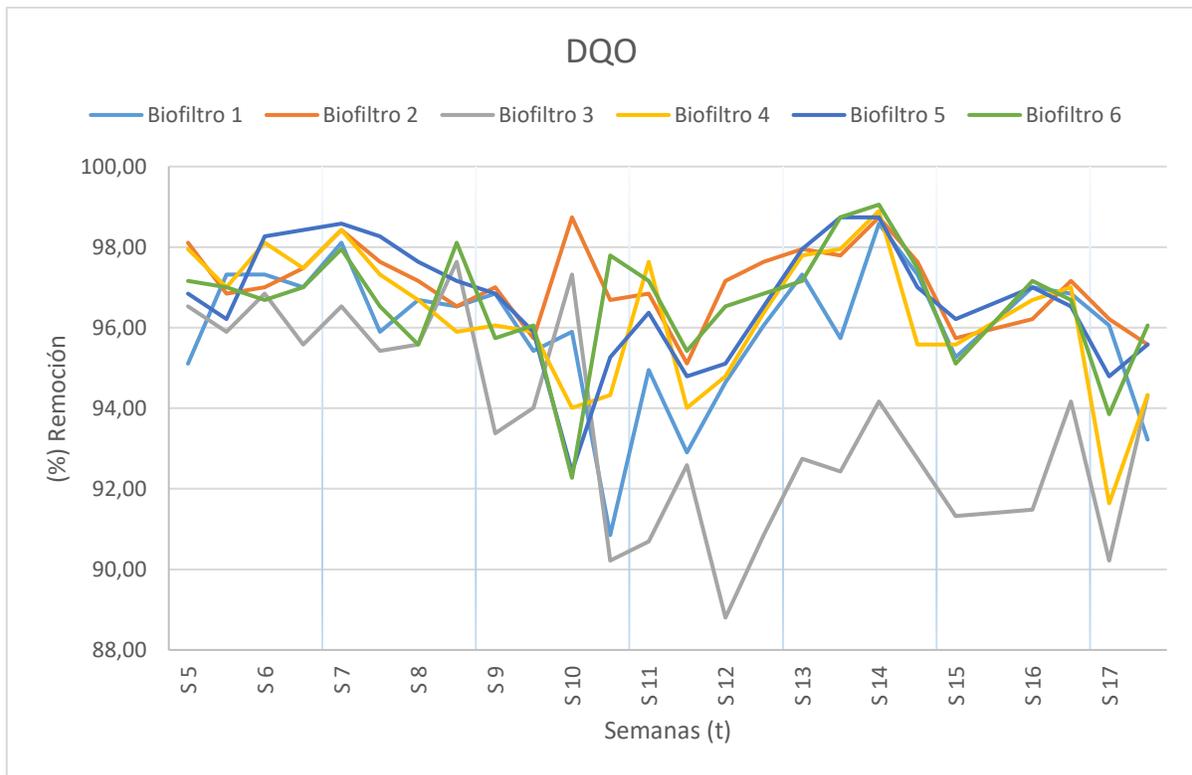


Figura 10. Porcentaje de remoción de la DQO en el periodo de monitoreo

Elaboración: Lomas, W.

Tabla 13. Eficiencia de remoción de DQO durante el periodo monitoreado

% Remoción	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
Min	90.85	95.11	88.80	91.64	92.43	92.27
Max	98.58	98.74	97.63	98.90	98.74	99.05
Promedio	95.96	97.04	93.57	96.29	96.68	96.59

Elaboración: Lomas, W.

Tabla 14. Análisis ANOVA de los biofiltros 2, 4 y 6 (75 cm de cuesco)

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Filtro 2	26	2523.1073	97.042587	0.9469942		
Filtro 4	26	2503.5489	96.290342	2.8572683		
Filtro 6	26	2511.2776	96.5876	2.0407993		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	7.4641414	2	3.7320707	1.9154993	0.154404096	3.1186421
Dentro de los grupos	146.12655	75	1.948354			
Total	153.59069	77				

Elaboración: Lomas, W.

REMOCIÓN DE NUTRIENTES

NITRÓGENO

El nitrógeno al ser un nutriente fundamental en el crecimiento de las plantas y los organismos protistas es muy importante al momento de evaluar cómo tratar las aguas residuales por tratamientos biológicos. Diariamente en la preparación del agua residual doméstica artificial se agregaba nitrógeno total ya que ayudaría a que nuestros microorganismos crezcan y se forme la biopelícula (Romero, 2002).

En la figura 11 se puede observar el porcentaje de remoción de nitrógeno total durante el monitoreo, no se toma en cuenta el periodo de acondicionamiento y se obtienen datos a partir de la semana 5, aunque en esas semanas se obtuvieron los picos más altos en cuanto a degradación del Nitrógeno total, se puede observar que no superan el 82.93% de remoción y no bajan del 39%. En la tabla 15 se aprecian las eficiencias de remoción del nitrógeno total de los 6 biofiltros durante todo el periodo monitoreado.

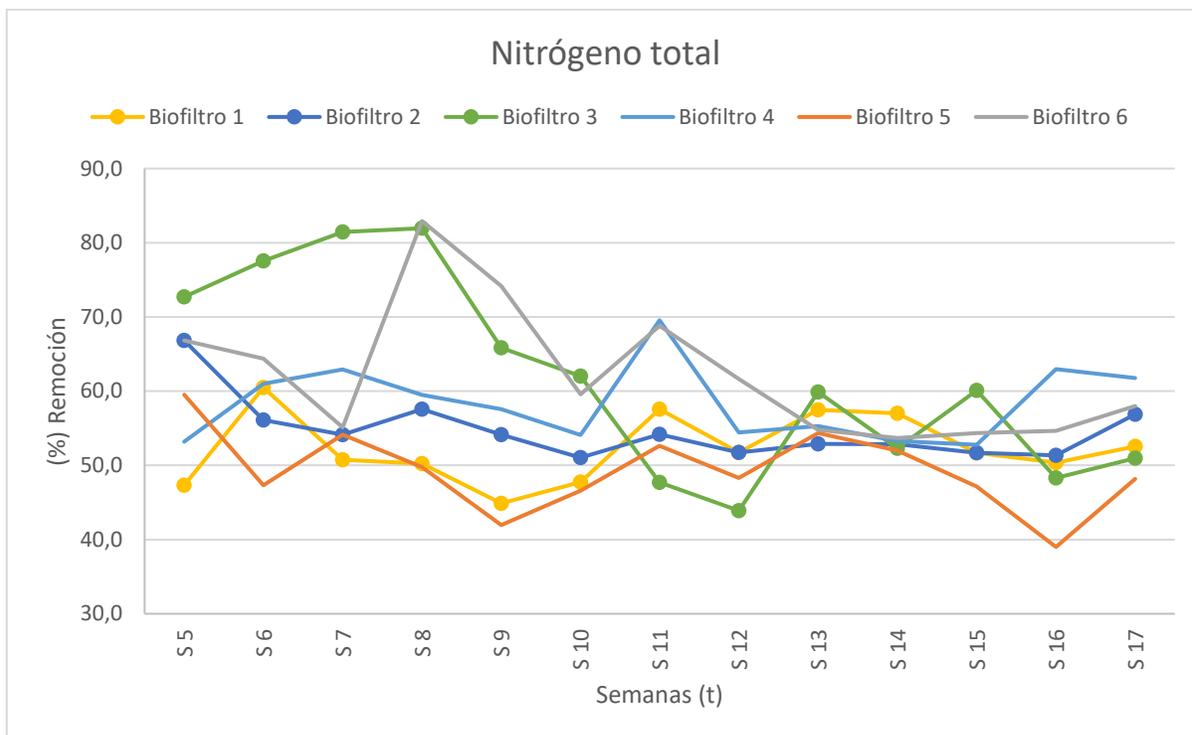


Figura 11. Porcentaje de remoción de Nitrógeno total durante el monitoreo

Elaboración: Lomas, W.

Tabla 15. Eficiencia de remoción de NT durante el periodo monitoreado

% Remoción	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
Min	44.88	51.04	43.89	52.77	39.00	53.68
Max	60.49	66.83	81.95	69.55	59.51	82.93
Promedio	52.29	54.72	61.90	58.33	49.29	62.22

Elaborado por: Lomas, W.

La remoción promedio que se obtuvo del monitoreo de los 6 filtros es de 56.5%, el B1 (52.29%), B2 (54.72%), B3 (61.90), B4 (58.33), B5 (49.9%) y B6 (62.22%), siendo el que más removió el filtro número 6 con una altura de 75 cm de cuesco y con un 62.22%, El análisis de varianza ANOVA reveló que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tamaños de partícula del material filtrante. Mientras que los biofiltros con menor porcentaje de remoción fueron el B3 (49.29%) y el B1 (52.29%) lo que indica que el tamaño de partícula más pequeño y la altura del lecho de 45cm son los menos eficientes. Por su parte tenemos que el promedio más bajo de remoción lo tiene el filtro número 5 que es el que mayor tamaño de material filtrante posee

y el que menos altura tiene. Peralta (2000), indica que la remoción de nitrógeno en aguas residuales es muy eficiente, aunque esta no se relacione con el ancho del material del biofiltro. Incluso se puede dar el caso de que los biofiltros muy pequeños o angostos aumenten la concentración de nitrógeno, la vegetación no influye en la efectividad de remoción de nitrógeno (Peralta, 2000). En la tabla 16 se encuentra el análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6

Tabla 16. Análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6 (75 cm de cuesco)

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Columna 1	13	711.343902	54.7187617	17.6818118		
Columna 2	13	758.27561	58.3288931	26.2369005		
Columna 3	13	808.797561	62.215197	80.3066728		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	365.442776	2	182.721388	4.4126582	0.01932077	3.25944631
Dentro de los grupos	1490.70462	36	41.4084617			
Total	1856.1474	38				

Elaboración: Lomas, W.

FÓSFORO

El fósforo es otro nutriente que al igual que el nitrógeno es necesario tenerlo controlado en los cuerpos de agua ya que propicia el crecimiento de algas indeseables por lo que es de interés removerlo de las aguas residuales (Romero, 2002).

En la figura 12 se puede notar que de la semana 5 a la semana 9 no hay una estabilidad en cuanto al porcentaje de remoción, en la semana 10 se obtuvo una remoción de entre el 30 al 40% hasta la semana 15 en los B1, B2, B3, B4 y B5 mientras que el B6 alcanza sus máximos picos de remoción y se mantiene hasta el final seguido del B2. En la tabla 17 se puede observar la eficiencia de remoción del fósforo total durante el periodo monitoreado.

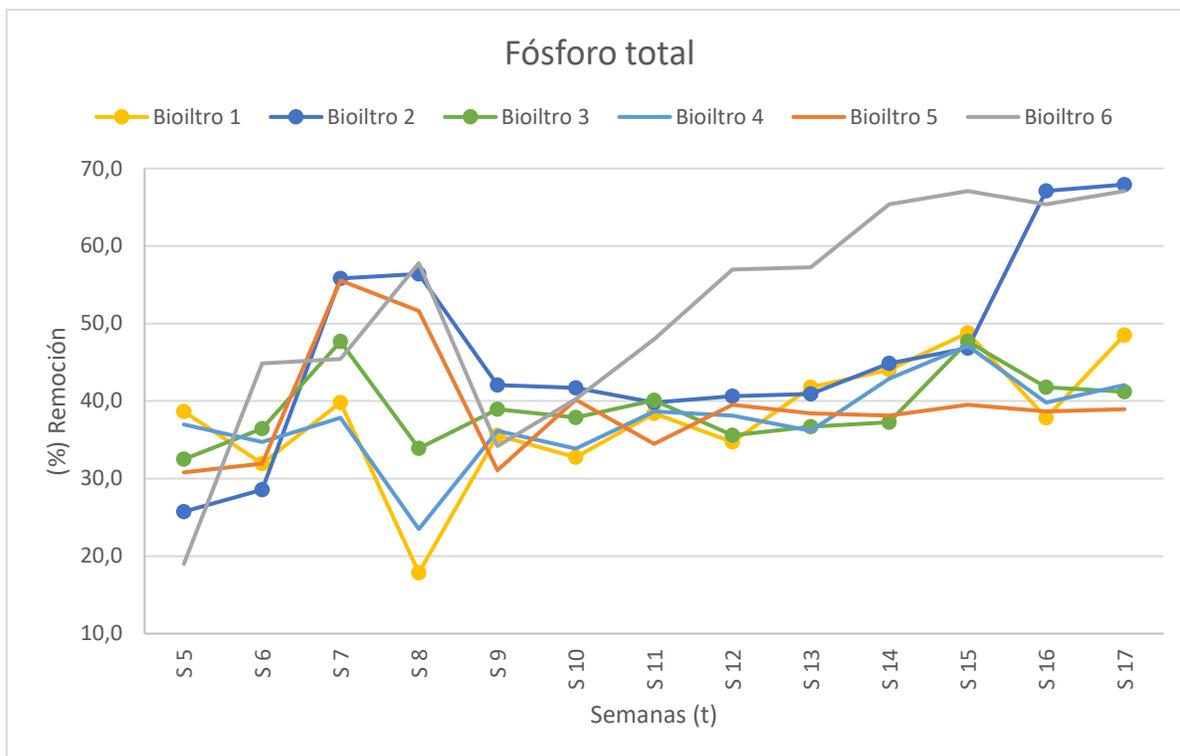


Figura 12. Porcentaje de remoción de Fósforo total durante el monitoreo

Elaborado por: Lomas, W.

Tabla 17. Eficiencia de remoción de FT durante el periodo monitoreado

% Remoción	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
Min	17.86	25.74	32.49	23.49	30.80	18.99
Max	48.80	67.93	47.68	47.12	55.56	67.09
Promedio	37.75	46.03	39.05	37.53	39.14	51.44

Elaboración: Lomas, W.

La remoción promedio que se obtuvo del monitoreo de los 6 filtros es de 41.8%, el B1 (37.75%), B2 (46.03%), B3 (39.05%), B4 (37.53%), B5 (39.14%) y B6 (51.44%), siendo el filtro 6 el que más removió un 51.44%, nos indica que el tamaño de partícula con mayor porcentaje de remoción es el de mayor tamaño (8.5 – 10 mm) al igual que la altura del lecho filtrante (75 cm). Por su parte tenemos que el promedio más bajo de remoción lo tiene el filtro 4 con (37.53%). En la tabla 18 encontramos el análisis de varianza ANOVA reveló que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tamaños de partícula del material filtrante. Mientras que los

biofiltros con menor tamaño de lecho filtrante mostraron las eficiencias más bajas B1 (37.75%), B3 (39.05%) y (39.14%) aunque en este caso el valor más bajo lo obtuvo el B4. Las eficiencias de remoción cuando el fósforo en forma de sólidos se sedimenta es alta alrededor de un 90% cuando se adhiere a la superficie del material y forma la biopelícula (Sosa Hernandez, 2015).

Tabla 18. Análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6 (75 cm de cuesco)

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Columna 1	13	598.39662	46.03051	164.52855		
Columna 2	13	487.8481	37.526777	30.899667		
Columna 3	13	668.66385	51.435681	212.66991		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1278.2768	2	639.13841	4.6984171	0.015381	3.2594463
Dentro de los grupos	4897.1776	36	136.03271			
Total	6175.4544	38				

Elaboración: Lomas, W.

REMOCIÓN DE SÓLIDOS

“Los sólidos de un agua residual pueden contener un 75% de materia orgánica” (Romero, 2002). Esta a su vez es una combinación de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y carbono. Una gran cantidad de los mismos puede ocasionar aguas turbias lo que puede ocasionar como consecuencia el aumento de la temperatura en los cuerpos de agua y con eso baja el oxígeno disponible, inhibe los procesos fotosintéticos y provocar así la muerte de especies acuáticas. En la figura 13 se observa el porcentaje de remoción de los SST en el periodo monitoreado y en la tabla 19 los valores promedio de remoción de cada filtro.

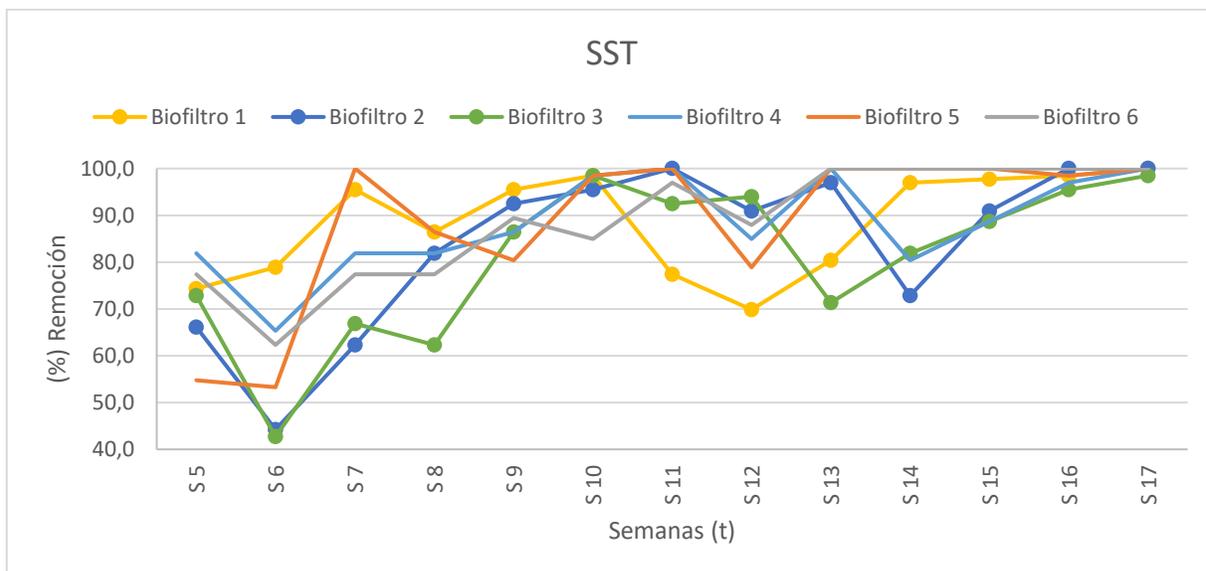


Figura 13. Porcentaje de remoción de Sólidos suspendidos totales durante el monitoreo

Elaborado por: Lomas, W.

En la figura 12 se puede observar como de la semana 5 a la semana 8 se están estabilizando los 6 biofiltros, a partir de esta hasta la semana 12 de monitoreo tienes porcentajes muy altos de remoción, la biofiltración en sí es un proceso el cual está destinado a contener la materia sólida en suspensión, haciéndolo pasar por el medio filtrante que usualmente es poroso (Payán, 2016), los sólidos se están adhiriendo al material, los microorganismos lo aprovechan para transformar toda esa materia orgánica en alimento. En la semana 12 y 14 varios filtros sufren un pequeño descenso en su remoción ya que se presentaban larvas y moscos dentro de los biofiltros.

Tabla 19. Porcentaje de remoción de Sólidos suspendidos totales durante el monitoreo

% Remoción	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
Min	69.86	44.24	42.73	65.34	53.28	62.32
Max	100.00	100.00	98.49	100.00	100.00	100.00
Promedio	88.46	84.17	80.93	88.23	88.52	88.75

Elaboración: Lomas, W.

La remoción promedio que se obtuvo del monitoreo de los 6 filtros es de 86.5%, B1 (88.46%), B2 (84.17%), B3 (80.93%), B4 (88.23%), B5 (88.52%) y B6 (88.75%) siendo el que más

removió el filtro número 6 con un 88.75% lo que indica que el tamaño de partícula que está más eficiente es el de mayor tamaño (8.5 – 10 mm) al igual que la altura del lecho filtrante (75 cm). Por su parte tenemos que el promedio más bajo de remoción lo tiene el filtro 3. En la tabla 20 encontramos el análisis de varianza ANOVA que nos indica que no hay diferencia significativa entre tratamientos respecto a la remoción de sólidos suspendidos totales debido a que el p-valor muestra valores superiores a 0,05 en todas las comparaciones efectuadas (Saltos & Zambrano, 2018).

Tabla 20. Análisis ANOVA de los biofiltros 2,4 y 6 (75 cm de cuesco)

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Columna 1	13	1094.2643	84.174175	311.41436		
Columna 2	13	1147.0188	88.232217	109.75164		
Columna 3	13	1153.7999	88.753838	150.1646		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	163.42346	2	81.711728	0.4290601	0.6544067	3.2594463
Dentro de los grupos	6855.9671	36	190.44353			
Total	7019.3906	38				

Elaboración: Lomas, W.

COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA

La temperatura durante el monitoreo básicamente dependía de las condiciones atmosféricas del día. Se mantuvo en un promedio de $16.8^{\circ}\text{C} \pm 0.3$ lo que una temperatura óptima para el crecimiento bacteriano. En la tabla 21 se aprecian las temperaturas registradas en los afluentes de los biofiltros.

Tabla 21. Temperaturas semanales en los biofiltros

Semanas (S)	Temperatura (°C)
S 1	16.9
S 2	17.1
S 3	16.9
S 4	16.7
S 5	16.9
S 6	16.4
S 7	16.5
S 8	16.6
S 9	16.7
S 10	16.9
S 11	16.9
S 12	17
S 13	17.4
S 14	17.4
S 15	16.5
S 16	16.8
S 17	17.1

Elaboración: Lomas, W.

Los procesos de biofiltración al ser tratamientos en donde se usan a microorganismos que se adhieren a los soportes de materia orgánica para descontaminar a través de reacciones enzimáticas es indispensable su desarrollo que incluye una temperatura adecuada de 22-24°C (Algeciras et al., 2002). Aunque algunos microorganismos anaerobios también se pueden desarrollar a 18°C (Muñoz & Aldás, 2017).

COMPORTAMIENTO DEL pH

El pH es un parámetro muy importante ya que un pH neutro o casi neutro de 7 ± 0.2 propicia el crecimiento bacteriano y lo ayuda a su desarrollo. (Algeciras et al., 2002). En la tabla 21 se aprecia el comportamiento de la temperatura de los 6 filtros durante todo el monitoreo.

Tabla 22. Comportamiento de la temperatura en el monitoreo

	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
S 1	7.0	6.7	6.3	6.4	6.4	6.3	6.4
S 2	6.9	6.5	6.1	6.2	6.0	6.1	6.1
S 3		6.8	6.6	6.4	6.2	6.4	6.4
S 4	6.5	6.7	6.5	6.3	6.3	6.4	6.4
S 5	6.6	6.5	6.8	6.8	7.0	6.4	6.6
S 6		6.6	6.6	6.8	6.7	7.0	7.0
S 7		6.9	6.7	6.3	6.8	6.8	6.9
S 8	6.4	6.3	6.8	6.3	6.2	6.4	6.5
S 9	6.6	6.5	6.5	6.6	6.7	6.3	6.7
S 10		6.9	7.0	6.6	6.3	6.6	6.7
S 11	6.2	6.3	6.7	6.8	6.9	6.7	6.2
S 12		6.3	6.4	6.5	6.8	6.6	6.6
S 13		6.5	6.5	6.4	6.6	6.7	6.6
S 14	6.7	6.8	6.5	6.2	6.5	6.9	6.7
S 15	6.1	6.7	6.7	6.7	6.9	6.1	6.8
S 16	6.3	6.6	6.6	6.8	6.4	6.6	6.7
S 17	6.3	6.7	6.9	7.0	6.4	6.2	6.1

Promedio	6.5	6.6	6.5	6.5	6.5	6.4	6.5
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Elaboración: Lomas, W.

Siendo S (semana). Se puede observar en la tabla 21 del pH es casi constante en todos los filtros con una media de 6.5, la temperatura ideal para que se reproduzcan los microorganismos y se puedan desarrollar. Siendo la temperatura óptima de 6-5 a 7-5 (Tejedor, 2019).

COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO

La importancia del oxígeno disuelto es que es un es de baja solubilidad en el agua requerido por toda la vida acuática aerobia. La baja concentración de OD limita la capacidad que tienen los cuerpos de agua de auto purificarse, este parámetro tiene una relación inversamente proporcional con la temperatura (Romero, 2002). En la tabla 22 se observa la cantidad de OD medido en los 6 biofiltros.

Tabla 23. Cantidad de OD medido en los biofiltros

	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
S 1	4.38	3.03	2.53	2.6	2.77	2.58	2.65
S 2	7.31	5.21	4.05	4.3	5.22	2.83	5.07
S 3		4.56	4.2	4.96	4.39	4.67	5.4
S 4	6.6	2.97	2.84	4.53	2.88	3.68	3.99
S 5	6.96	7.01	6.96	6.93	6.9	6.98	6.96
S 6		6.61	6.6	6.78	6.74	6.96	6.97
S 7		6.79	6.91	6.21	6.53	6.78	6.95
S 8	7.15	6.88	7.03	6.13	6.93	7	7.04
S 9	6.71	6.89	6.97	6.56	6.84	7.04	7.02
S 10		6.98	6.95	6.23	6.42	6.69	6.74
S 11	7.07	6.65	6.99	5.87	6.55	6.92	6.97
S 12		6.96	6.9	6.53	6.83	6.95	6.94
S 13		6.75	6.91	6.60	6.81	6.88	6.84
S 14	6.97	6.53	6.92	6.67	6.78	6.81	6.74
S 15	7.16	6.80	7.04	6.45	6.73	7.07	7.1
S 16	7.13	6.80	6.93	6.64	6.75	6.92	6.92
S 17	7.01	7.09	7.1	7.02	7.11	7.06	7.14

Promedio	5.7	5.5	5.4	5.3	5.4	5.5	5.6
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Elaboración: Lomas, W.

Siendo S (semana), en la tabla 22 se puede observar la cantidad de OD que estuvo presente durante el monitoreo. Con un promedio de 5.7 mg/L, está una condición aceptable que es adecuada para la vida de la gran mayoría de especies. Siendo un sistema anaerobio, la concentración ideal de oxígeno es mayor a 1.5 mg/L (Muñoz & Aldás, 2017).

ANÁLISIS DEL BIOFILM

A medida que la corriente de agua residual artificial atraviesa el lecho filtrante, los contaminantes se transfieren desde la corriente a la biopelícula que se desarrolla en el sustrato orgánico (Rahmat et al., 2017). En la Figura 14 se puede observar que en la superficie de las muestras de cuesco se presentan compuestos adheridos.



Figura 14. Biofilm presente en el cuesco

Elaboración: Lomas, W.

De acuerdo a que la biopelícula es una acumulación de microorganismos sobre una superficie y mediante pruebas SEM realizadas en donde se observó la presencia de biofilm se determinó en al menos en cada 5 g de cuesco se encuentra 0.0539 g de biofilm. La figura 15 indica mediante análisis SEM la diferencia del cuesco limpio y el cuesco del filtro 6 después de las 6 semanas de monitoreo.

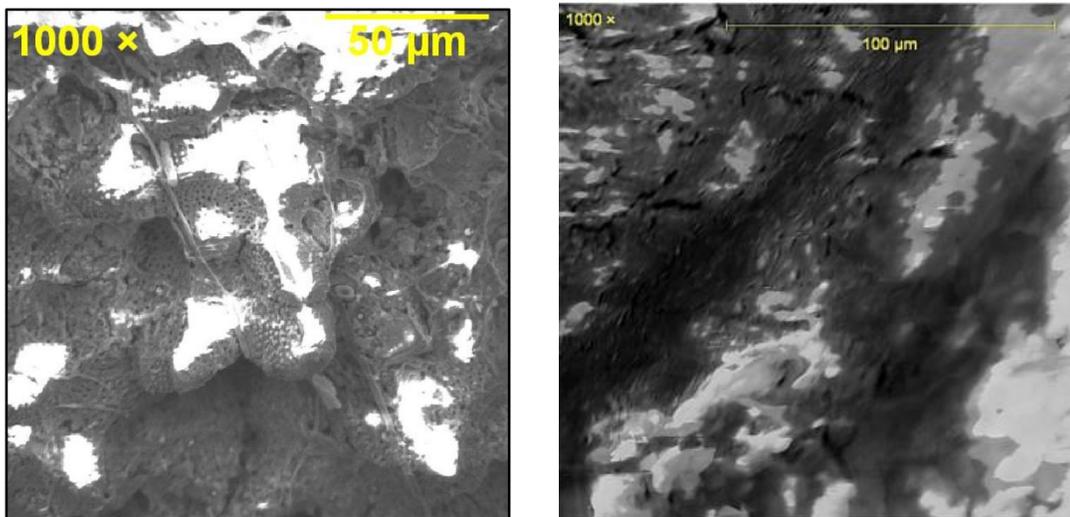


Figura 15. Micrografía SEM a 1000X de la muestra Cuesco (MI-20-0669) / Micrografía SEM a 1000X de la muestra Filtro 6 (MI-21-0752)

Elaboración: Lomas, W.

Se observa en la figura 15 la obstrucción de los poros en la superficie del material orgánico (cuesco de palmiste) por la formación del biofilm. Como se aprecia el cambio del material original y después de ser expuesto a tolueno. (Lebrero, 2013)

3.2 CONCLUSIONES

Los biofiltros hechos a base de materiales orgánicos filtrantes como el cuesco pueden utilizarse de forma económica para producir efluentes de alta calidad gracias a su eficacia constante en la eliminación de compuestos orgánicos, debido a su sencillez de construcción y su larga vida útil. Además, demostraron disminuir la carga contaminante en aguas residuales sintéticas: DQO (91.10%), nitrógeno total (56.5%), fósforo total (41.8), sólidos suspendidos totales (86.5%).

En la caracterización física-química del cuesco se determinó que, por su gran contenido de lignina (48.94%), celulosa (24.96%) y hemicelulosa (23.13%) le dan una propiedad única que lo hace útil para diferentes aplicaciones ya que es un material fibroso considerado como un pellet natural. Además, la porosidad observada por técnica MEB permite identificar fácilmente la formación de la biopelícula de manera física ya que mediante análisis FTIR y Raman se observa los cambios químicos en sus enlaces a nivel estructural.

Al realizar los ensayos con 6 filtros en donde se variaron los tamaños de partícula y la altura del lecho, se establecieron relaciones sobre cuáles son los más eficientes y en que parámetros predominan, llegando a la conclusión que el parámetro más importante es la altura del lecho, los filtros de 75 cm de altura en comparación de los filtros con alturas de 45 cm resultaron mejores en porcentajes de remoción de DQO, NT, FT y SST, ya que mediante el análisis ANOVA la diferencia del tamaño en las partículas resultó no ser determinante en esta investigación ya que la diferencia era mínima en todos los casos.

El biofiltro que consiguió el mayor porcentaje de remoción de DQO fue el B2 (97.04%) con 75 cm de cuesco y 5-6.5 mm de diámetro de partícula, mientras que, en el resto de análisis, nitrógeno total (62.22%), fósforo total (51.4%) y SST (88.75%) el B6 fue el más eficiente con 75 cm de cuesco y de 8-10 mm de diámetro de partícula.

En el análisis de los factores como el pH, temperatura y OD se destaca que estos influyen positivamente en toda la operación de los biofiltros ya que contaban con condiciones aptas para el desarrollo del biofilm, temperaturas de 16.7°C, pH de 6.5 y OD de 5.5mg/l para el crecimiento bacteriano que se pudo observar mediante el microscopio y MEB.

3.3 RECOMENDACIONES

En estudios a futuro se recomienda realizar estudios sobre la comunidad de microorganismos que crecen en la biopelícula para identificar cuáles son las bacterias que actúan en todo el proceso de depuración de aguas residuales.

Se sugiere activar el cuesco mediante procesos térmicos ya que en la bibliografía se demostró que este material como carbón activado adsorbe metales pesados como el Cd, Cu, Pb, Zn y Ni.

Se recomienda monitorear los biofiltros por un periodo más extenso ya que en la presente investigación no se llegó a determinar si en algún momento se sobresaturan o en qué etapa pierden su capacidad de remoción en más de 75%.

Se propone que para futuros estudios sobre el material en la creación de biofiltros se modifiquen más los tamaños de partícula desde el polvo hasta los agregados más grandes para ver las diferencias en la carga hidráulica y las eficiencias de remoción

Con la final de estudiar más las propiedades adsorbentes del cuesco se sugiere utilizar más tipos de aguas residuales, no solo la doméstica puede ser la farmacéutica, agrícola, minera entre otras.

Se aconseja utilizar un sistema de bombeo que pueda asegurar la distribución uniforme del caudal para todos los biofiltros ya que muchas veces se taponan, además que es recomendable que al menos ajusten el caudal manualmente unas 3 veces al día ayudado con una probeta y un reloj para así calcular el caudal.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akinwole, B., Olusegun, A., & Babatunde, A. (2014). *Performance of Palm Kernel Shell as Nitrification Media for Aquaculture Wastewater at Varying Drying Time*. (May).
- Algeciras, N., Barrera, R., Martínez, M. M., Pedroza, A., Reyes, C., Rodríguez, E., ... Rojas, S. (2002). Desarrollo de un sistema de biofiltración con bacterias proteolíticas y amilolíticas inmovilizadas utilizando subproductos del beneficio de café. *Revista de la Sociedad Química de México*, 46(3), 271–276. Recuperado de <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/475/47546317/47546317.html>
- Almeida-Naranjo, C. E., Espinoza-Montero, P. J., Muñoz-Rodríguez, M. I., & Villamar-Ayala, C. A. (2017). Hydraulic Retention Time Influence on Improving Flocculation in the Activated Sludge Processes Through Polyelectrolytes. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(7), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3427-0>
- Arango Ruiz, Á. (2004). *La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua* (Vol. 1). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69510210>
- Arzola, N., Gómez, A., & Rincón, S. (2012). The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters. *Ingeniería e Investigación*, 32(1), 24–29.
- Calderón, M., Andrade, F., Lizarzaburu, L., & Masache, M. (2017). Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador. *Estudios del cambio climático en América Latina*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32632.96005>
- Chaudhary, D., Vigneswaran, S., Ngo, H., Shim, W., & Moon, H. (2003). Biofilter in Water and Wastewater Treatment. *Treatise on Water Science*, 4(6), 529–570. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00095-6>
- Chong, H. L. H., Chia, P. S., & Ahmad, M. N. (2013). The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresource Technology*, 130, 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.136>
- Cóndor, V. (2019). *Evaluación de las propiedades físico-químicas de residuos oleaginosos y su*

comportamiento hidraulico como lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales domésticas. 157.

- Dan, S. A. M., Hashim, F. H., Raj, T., Huddin, A. B., & Hussain, A. (2018). Classification of oil palm Fresh Fruit Bunches (FFB) using Raman spectroscopy. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4), 184–188. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.11.20798>
- Deng, S., Chen, J., & Chang, J. (2021). Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>
- Edmund, C. O., Christopher, M. S., & Pascal, D. K. (2014). Characterization of palm kernel shell for materials reinforcement and water treatment. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.5897/jcems2014.0172>
- Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2011). Potencial uses of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in food processing and engineering. En *J. Food Eng.* (Vol. 3).
- García, M. E., & Pérez, J. A. (2003). *AGUAS RESIDUALES. COMPOSICIÓN*. Recuperado de http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- Gauss, M., Cáceres, V., & Fong, N. (2004). *Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua y Centroamérica* (p. 18). p. 18. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan3/040065/tema3-7.pdf>
- Haseena, M. (2017). Water pollution and human health. *Water, Air, and Soil Pollution*, 5(3), 289–297. <https://doi.org/10.1007/BF00158344>
- Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment*. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=41JButufnm8C&oi=fnd&pg=PA33&dq=wastewater+characterization&ots=nUB6h2CJ_m&sig=rLk5uXBl-507FefyBz60BVSdHUY#v=onepage&q=wastewater+characterization&f=false
- Heredia, M. (2017). Cuesco de palma africana , un nuevo combustible para uso comercial en Ecuador : análisis económico y evidencia experimental. *Somos MAGAP*, (May), 15. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19364.07042>

- Heredia Salgado, M. A., Tarelho, L. A. C., Matos, M. A. A., Rivadeneira, D., & Narváez C, R. A. (2019). Palm oil kernel shell as solid fuel for the commercial and industrial sector in Ecuador: tax incentive impact and performance of a prototype burner. *Journal of Cleaner Production*, 213, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.133>
- Hossain, M. A., Ngo, H. H., Guo, W. S., & Nguyen, T. V. (2012). Palm oil fruit shells as biosorbent for copper removal from water and wastewater: Experiments and sorption models. *Bioresource Technology*, 113, 97–101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.111>
- Huertas, R., & Marcos, C. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. 70. Recuperado de https://drive.google.com/file/d/0B8D2_Q6wgqIRdHNNdks2QVhfNXc/view?usp=sharing
- Johnson Alengaram, U., Al Muhit, B. A., bin Jumaat, M. Z., & Jing, M. L. Y. (2013). A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials. *Materials and Design*, 51(2013), 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.078>
- Lebrero, Raquel; Estrada, José M.; Muñoz, Raúl; Quijano, Guillermo (2014). Deterioration of organic packing materials commonly used in air biofiltration: Effect of VOC-packing interactions. *Journal of Environmental Management*, 137(), 93–100. doi:10.1016/j.jenvman.2013.11.052
- Markovičová, L., & Zatkalíková, V. (2016). The Effect of Filler Content on the Mechanical Properties of Polymer Composite. *Applied Mechanics and Materials*, 858(April), 190–195. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.858.190>
- Ministerio de Comercio Exterior. (2017). *Informe sobre el sector palmicultor ecuatoriano*. 82. Recuperado de <https://www.comercioexterior.gob.ec/wp-content/uploads/2017/09/informe-palma-español-.pdf>
- Muñoz, M., & Aldás, M. B. (2017). *Sistemas de depuración de aguas residuales*.
- Nabinejad, O., Sujan, D., Rahman, M. E., & Davies, I. J. (2015). Effect of oil palm shell powder on the mechanical performance and thermal stability of polyester composites. *Materials and Design*, 65, 823–830. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.080>
- Nasir, S., Hussein, M. Z., Yusof, N. A., & Zainal, Z. (2017). Oil palm waste-based precursors

- as a renewable and economical carbon sources for the preparation of reduced graphene oxide from graphene oxide. *Nanomaterials*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/nano7070182>
- Ogedengbe, O., Oriaje, A. T., & Tella, A. (1985). Carbonisation and activation of palm kernel shells for household water filters. *Water International*, 10(3), 132–138. <https://doi.org/10.1080/02508068508686330>
- Okoli, I. (2020). *Oil Palm Tree Wastes 6: Uses of the palm kernel shell*. Recuperado de <https://researchtropica.com/oil-palm-tree-wastes-6-uses-of-the-palm-kernel-shell/>
- Okoroigwe, E. C., & Saffron, C. M. (2012). Determination of Bio-Energy Potential of Palm Kernel Shell By Physicochemical Characterization. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 31(3), 329–335.
- Payán, S. (2016). Estudio Y Diseño De Biofiltro a Partir De Materia Orgánica Para El Tratamiento De Agua. *Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.*, 141. Recuperado de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/583/1/Tesis Sergio Arturo Payán Gómez.pdf%0Ahttp://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/29845>
- Peralta, J. M. (2000). *Biofiltros Y Su Eficiencia En La Remoción De Nitratos*. 65–75.
- Pratap, B., Kumar, S., Nand, S., Azad, I., Bharagava, R. N., Romanholo Ferreira, L. F., & Dutta, V. (2023). Wastewater generation and treatment by various eco-friendly technologies: Possible health hazards and further reuse for environmental safety. *Chemosphere*, 313, 137547. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137547>
- Rahmat, A. N., Qamaruz Zamana, N., & Azan Tajarudin, H. (2017). Biomass as Packing Material for Biofiltration of Gaseous Streams. *Engineering Heritage Journal*, 1(1), 45–48. <https://doi.org/10.26480/gwk.01.2017.45.48>
- Romero, J. A. (2002). *Tratamiento de Aguas Residuales* (p. 1233). p. 1233. Recuperado de file:///D:/VII CICLO JULIANA/TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES/SEMANA 6/INVESTIGACIONES/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_R.pdf
- Ruiz-delgado, J. (2022). *Guía ambiental para la Agroindustria de la Palma de Aceite*.
- Saltos, J., & Zambrano, J. (2018). Implementación De Biofiltro Para Remoción Sólidos En Aguas Residuales De Procesamiento De Almidón Yuca, Alrededor De Comunidad San Pablo Tarugo- Chone, Manabí. *Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí*

Manuel Félix López.

- Schmidt, D., Jacobson, L., & Nicolai, R. (2020). Biofilter design information. *University of Minnesota*, (March). Recuperado de <http://www.extension.umn.edu/agriculture/manure-management-and-air-quality/air-quality/biofilter-design-information/>
- Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., & Kochubabu, M. (2011, enero). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products*, Vol. 33, pp. 7–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.009>
- Smith, K. C. A., & Oatley, C. W. (2012). The scanning electron microscope and its fields of application. *British Journal of Applied Physics*, 6(11), 391–399. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/6/11/304>
- Sosa Hernandez, D. B. (2015). Uso de astillas de madera de mezquite (Prosopis) en un sistema de biofiltros para tratar aguas residuales municipales. *Tesis De Maestria*, 90.
- Syakila Nasaruddin, N., & Maya Saphira Radin Mohamed, R. (2021). An Overview of Activated Carbon Coconut Shell and Banana Trunk Fiber as Bio-Filter for Kitchen Wastewater Treatment. *Journal of Advancement in Environmental Solution and Resource Recovery*, 1(1), 29–35. Recuperado de <http://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/jaesrr>
- Tejedor, J. (2019). *MANÍ PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO*.
- Toledo, M. (2023). *Espectroscopía Raman*. Recuperado de https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/Raman-Spectroscopy.html
- Torres, P., Rodríguez, J. A., & Uribe, I. E. (2003). Tratamiento De Aguas Residuales Del Proceso De Extracción De Almidón De Yuca En Filtro Anaerobio: Influencia Del Medio De Soporte. *Scientia et Technica*, 3(23), 75–80. <https://doi.org/10.22517/23447214.7393>
- Vigueras-Cortés, J. M., Villanueva-Fierro, I., Garzón-Zúñiga, M. A., De Jesús Návar-Cháidez, J., Chaires-Hernández, I., & Hernández-Rodríguez, C. (2013). Performance of a biofilter system with agave fiber filter media for municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 68(3), 599–607. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.285>
- Yew, M. K., Bin Mahmud, H., Ang, B. C., & Yew, M. C. (2014). Effects of oil palm shell coarse aggregate species on high strength lightweight concrete. *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/387647>

5. ANEXOS

Anexo I. MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y Espectroscopia Raman



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3735
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



- Termohigrómetro marca ELITECH, modelo RCW-800 wifi con una apreciación de 0,1 °C y 0,1 %HR.
- Espectroscopio Raman marca: Horiba Scientific, modelo: Lab Ram Evolution.

MÉTODO EMPLEADO

- *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

Las micrografías fueron adquiridas con las siguientes condiciones:

Voltaje de aceleración: 20 kV
Distancia de trabajo: 18,2 mm
Filamento: 65,3%
Emisión de corriente: 131,8 μ A
Presión de vacío: $2,6 \times 10^{-5}$ Torr
Magnificaciones: 25X, 250X, 500X y 1000X

- *Espectroscopia Raman*

Para el análisis de las muestras se utilizaron las siguientes condiciones:

- Longitud de onda del láser utilizado: 532 nm
- Rejilla de difracción utilizada: 1800 gr/mm
- Potencia del láser: 50 mW
- Potencia del láser filtrada y utilizada: 3,2%
- Apertura confocal: 200 μ m
- Lente objetiva utilizada: 50X – LWD
- Rango del número de onda utilizado: 300 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}
- Resolución espectral: $0,35 \text{ cm}^{-1}$
- Tiempo de adquisición: 10 s
- Acumulaciones: 16

RESULTADOS

- *Microscopía Electrónica de Barrido*

A continuación, se presenta la microscopía obtenida a 1000X de la muestra. Cabe señalar que las micrografías a 25X, 250X, 500X y 1000X fueron enviadas al cliente en formato digital el 09 de diciembre de 2020.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3735
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

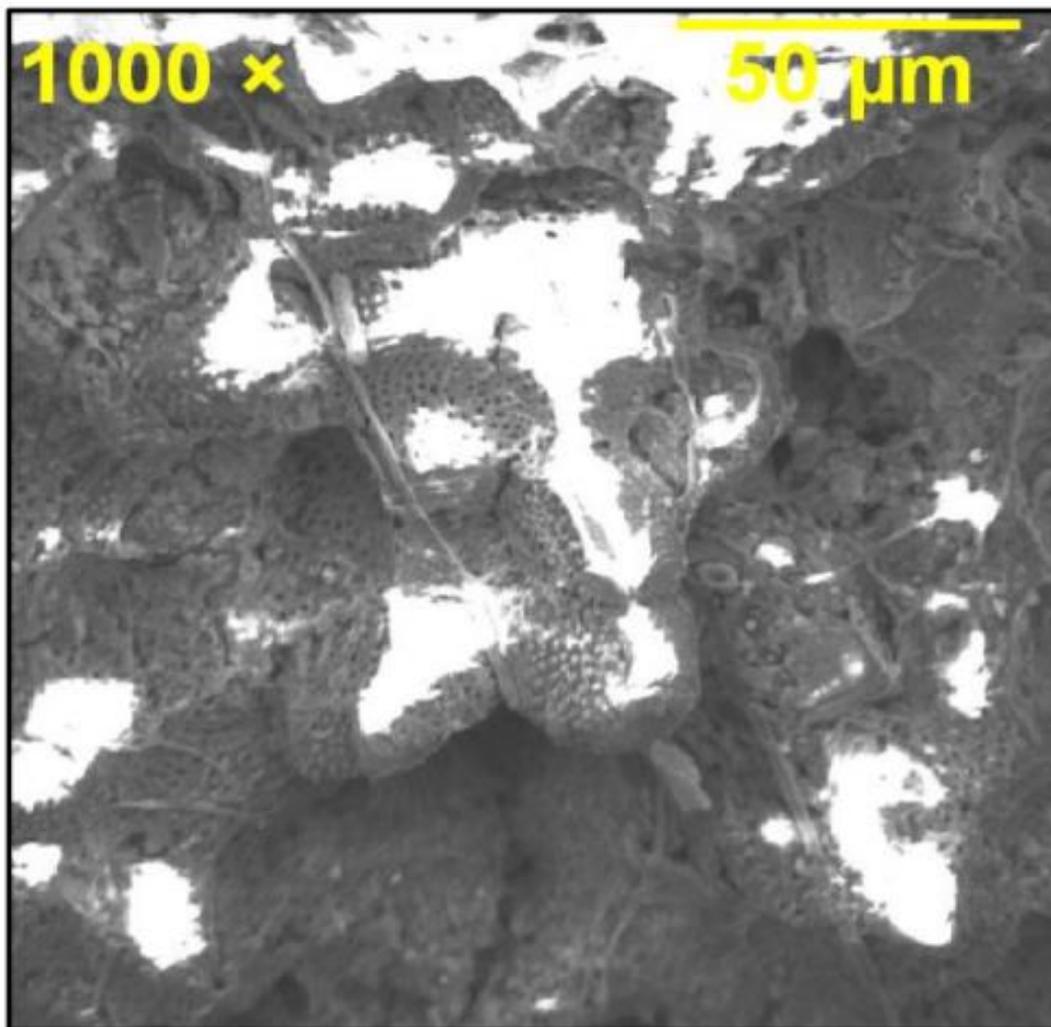


Figura 1. Micrografía SEM a 1000X de la muestra Cuesco (MI-20-0669)

El cliente puede hacer uso académico de los resultados presentados en este informe, así como de los respaldos enviados en formato electrónico para su tratamiento.



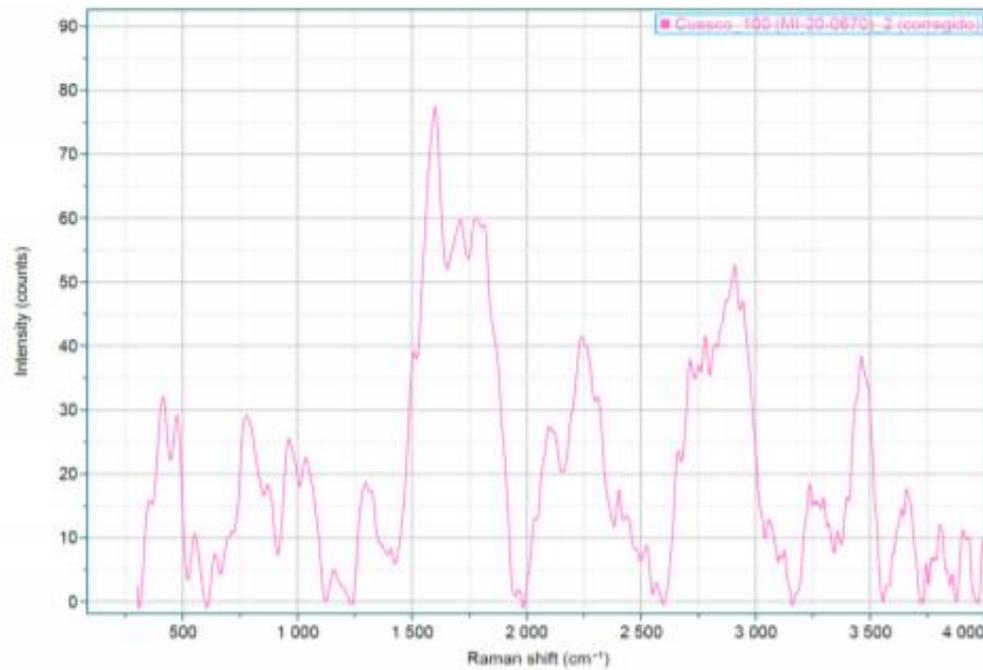
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3735
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



- Espectroscopía Raman

En la figura 2 se presenta el espectro Raman de la muestra "Cuesco" (MI-20-0670)



Date	04.12.2020 10...	Acq. time (s)	10	Accumulations	36	Laser (nm)	633
Spectro (cm ⁻¹)		Hole	180.014	Slit		Grating	1800 grimm
ND Filter	5%	Objective	x50LWD	ICS correction	On	Range (cm ⁻¹)	

Figura 2. Espectro Raman de la muestra "Cuesco" (MI-20-0670)



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño

RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3735

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



OBSERVACIÓN: La normativa para la organización y gestión de los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional, capítulo IV (De la difusión) menciona: "Si la contribución de un laboratorio es significativa y sustancial para la realización de una publicación, se deberá colocar al miembro(s) del laboratorio que contribuyó al desarrollo de la investigación como co-autor(es) de la publicación realizada". En este caso, por favor mantener comunicado al LANUM.

**NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S)
SOMETIDA(S) A ENSAYO**

Realizado por:

Ing. Salomé Galeas H.
Analista Técnica

Revisado y aprobado por:

Ing. Orlando Campaña
Responsable Técnico (S)

Autorizado por:

Paulina Romero, Ph.D.
Coordinadora del Laboratorio

Anexo II. MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y Espectroscopia Raman del filtro 3 y 6



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



- Acumulaciones: 36

RESULTADOS

- *Microscopía Electrónica de Barrido*

En las figuras de la 1 a la 5, se presentan las micrografías más representativas (magnificación 1000 X) obtenidas de las muestras filtro 3, filtro 6, fibra original y fibra final respectivamente. Cabe señalar que las micrografías completas a 25X, 250X, 500X y 1000X de cada muestra fueron enviadas al cliente en formato digital 04/10/2021.

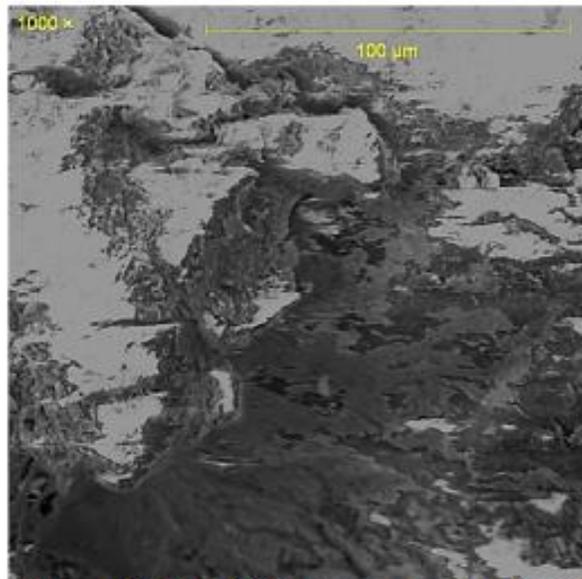


Figura 1. Micrografía SEM a 1000X de la muestra Filtro 3 (MI-21-0751)



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

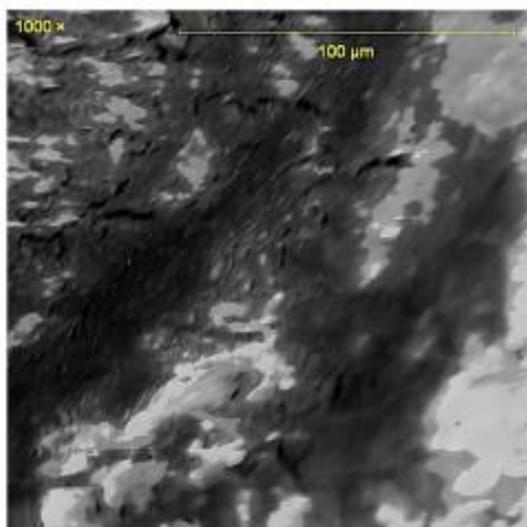


Figura 2. Micrografía SEM a 1000X de la muestra Filtro 6 (MI-21-0752)

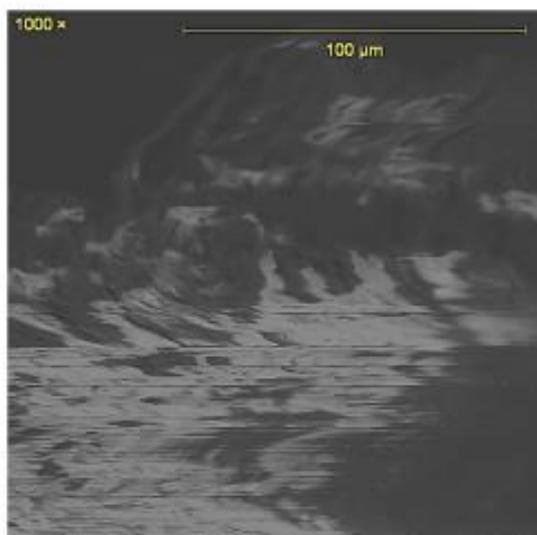


Figura 3. Micrografía SEM a 1000X de la muestra Fibra original (MI-21-0753)



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

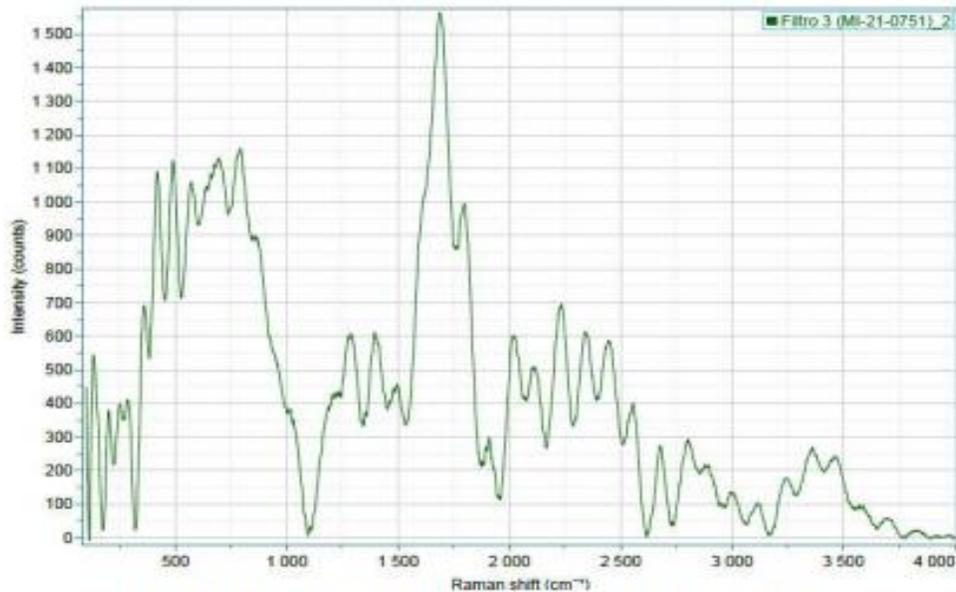


Figura 5. Espectro Raman de la muestra Filtro 3 (MI-21-0751)

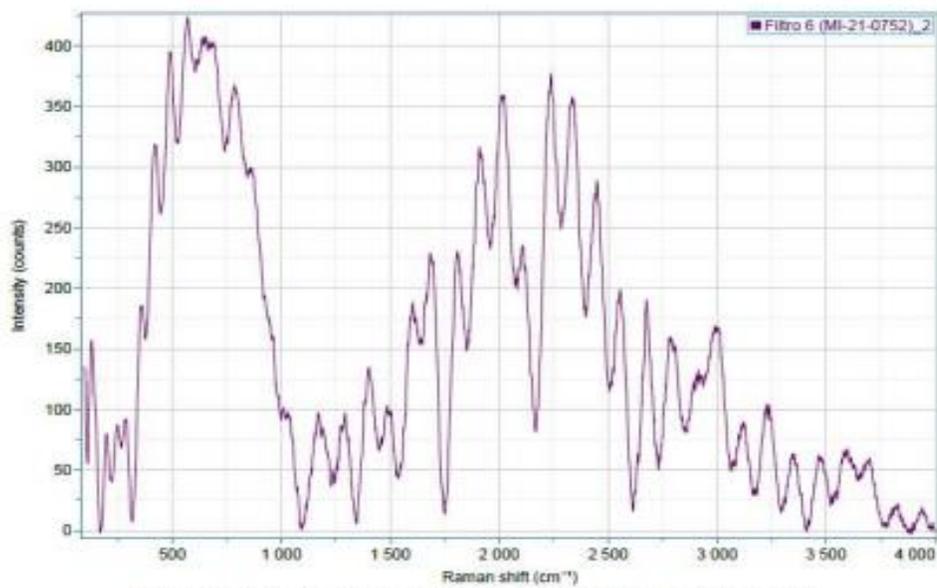


Figura 6. Espectro Raman de la muestra Filtro 6 (MI-21-0752)



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



OBSERVACIÓN: La normativa para la organización y gestión de los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional, capítulo IV (De la difusión) menciona: "Si la contribución de un laboratorio es significativa y sustancial para la realización de una publicación, se deberá colocar al miembro(s) del laboratorio que contribuyó al desarrollo de la investigación como co-autor(es) de la publicación realizada". En este caso, por favor mantener comunicado al LANUM.

"El cliente puede hacer uso académico de los resultados presentados en este informe, así como de los respaldos enviados en formato digital para su tratamiento".

NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S) SOMETIDA(S) A ENSAYO

NOTA DE DESCARGO DE RESPONSABILIDAD: En caso de que las muestras entregadas no cumplieran con las especificaciones solicitadas por el LANUM (dimensiones, cantidad de muestra), y a pesar de eso el cliente diera su consentimiento para la realización de análisis, el LANUM no se responsabiliza si los resultados son afectados debido a estas desviaciones (no cumplimiento de especificaciones)

Realizado por:

Ing. Orlando Campaña
Analista Técnico

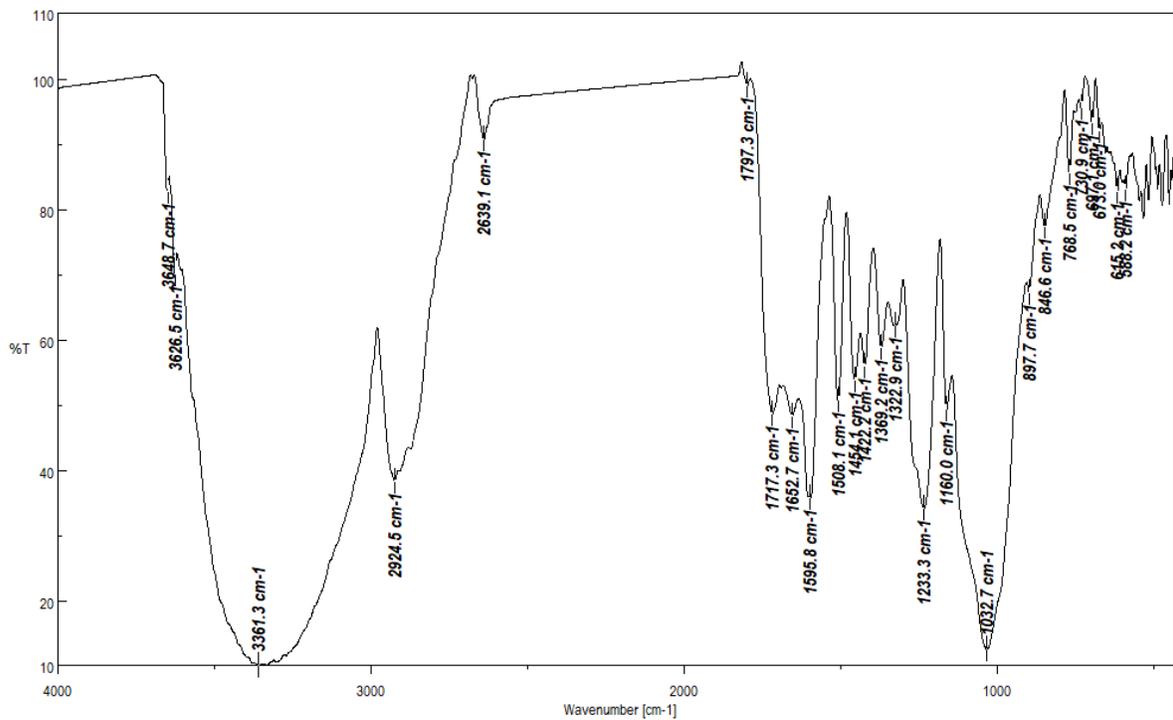
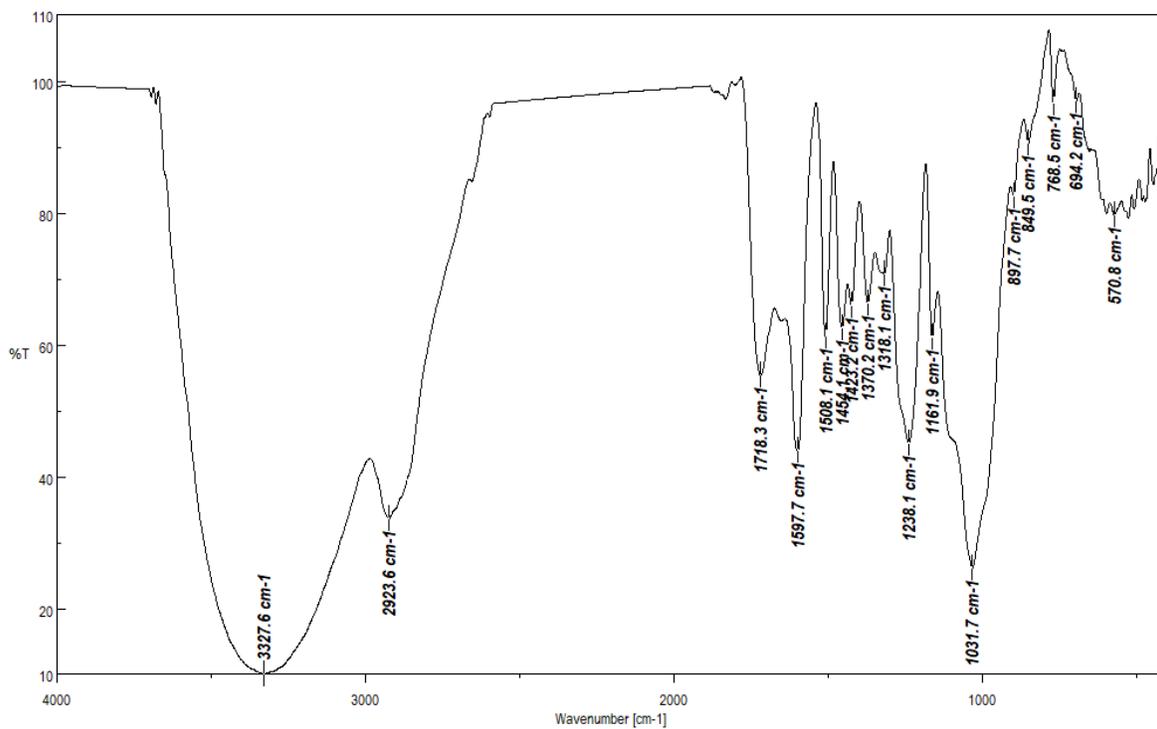
Revisado y aprobado por:

Ing. Karina Lagos
Responsable Técnica (S)

Autorizado por:

Paulina Romero, Ph.D.
Coordinadora del Laboratorio

Anexo III. ANÁLISIS FTIR DEL CUESCO LIMPIO Y DEL FILTRO 6



Elaboración: Lomas, W.

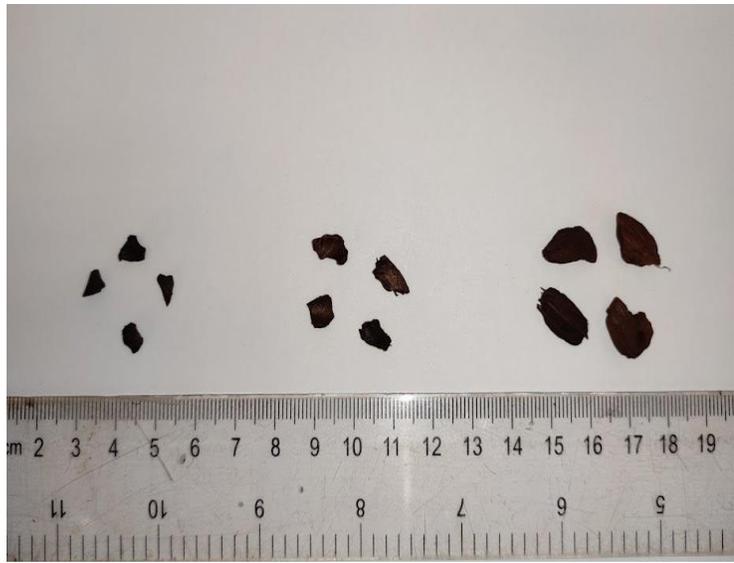
Anexo IV. Construcción de los biofiltros



Elaboración: Lomas, W.

Anexo V. Análisis físicos del cuesco

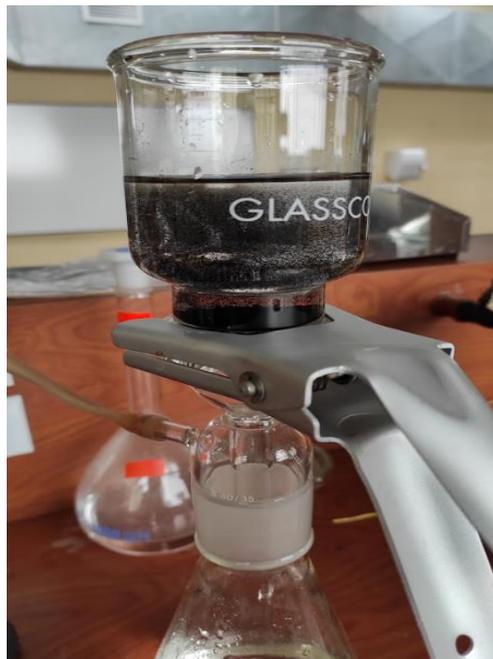
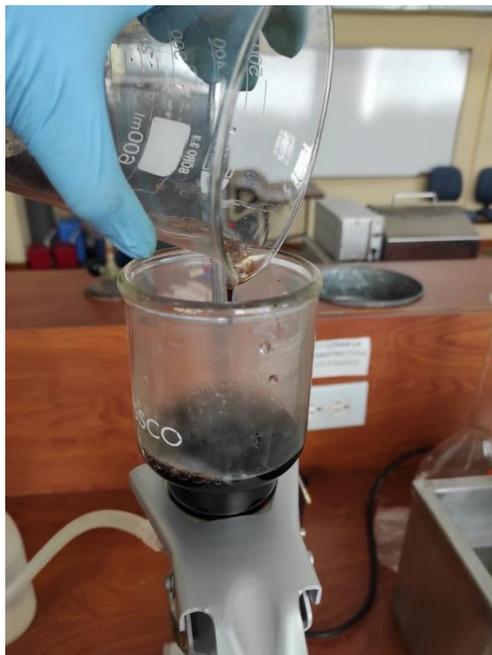






Elaboración: Lomas, W.

Anexo VI. Análisis químicos del cuesco





Elaboración: Lomas, W.

Anexo VII. Preparación de aguas residuales artificiales domésticas



Elaboración: Lomas, W.

Anexo VIII. Análisis de DQO, NT, FT, SST, OD, PH y T





Elaboración: Lomas, W.

Densidad real

	A	B	P
Tamaño de partícula	0.1639	0.0254	0.1385
5-6.5mm	0.1325	0.0282	0.1043
	0.0825	0.0167	0.0658

Tamaño de partícula	0.4131	0.0974	0.3157
6.5-8mm	0.3812	0.0968	0.2844
	0.3025	0.0754	0.2271

Tamaño de partícula	1.1121	0.2711	0.841
8-10mm	0.5433	0.1191	0.4242
	0.9637	0.2402	0.7235
	0.522	0.1309	0.3911

	0.3901	0.0938	0.2963
	0.3035	0.0656	0.2379
	0.5933	0.1259	0.4674
	0.7334	0.1684	0.565
	0.5332	0.1282	0.405
	0.1665	0.0353	0.1312

Valores divergentes 0.041129

ρ
1.181512
1.268354
1.251806

1.30644
1.338235
1.329894

1.320252
1.278727
1.329879
1.332575
1.314478
1.273718
1.267344
1.295989
1.31445
1.267037

Mediciones	Tabla	Resultado
1		1.1815
2		1.2684
3		1.2518
4		1.3064
5		1.3382
6		1.3299
7		1.3203
8		1.2787
9		1.3299
10		1.3326
		1.2938

1	1.3203
2	1.2787
3	1.3299
4	1.3326
5	1.3145
6	1.2737
7	1.2673
8	1.2960
9	1.3144
10	1.2670
	1.2994

Elaborado por: Lomas, W.

Porosidad

$$\delta_{aparente} = \frac{m}{V_{aparente}} \quad \delta_{real} = \frac{m}{V_{real}}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_{real} - \delta_{aparente}}{\delta_{real}}$$

δ_{real}	1.3818
$\delta_{aparente}$	1.2785
ε	0.0747342 7.4734243

Elaborado por: Lomas, W.

Anexo X. Datos estadísticos funcionamiento de los biofiltros

Porcentaje de remoción de DQO (%)

	SEMANA	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
4-oct	Semana 1	634	36.59	62.62	29.34	61.20	39.12	53.94
11-oct	Semana 2	634	45.27	63.25	49.05	64.04	46.53	64.83
18-oct	Semana 3	634	75.71	68.45	68.45	74.13	56.15	71.92
25-oct	Semana 4	634	58.04	67.98	64.98	73.97	57.73	65.46
30-oct	Semana 5	634	95.11	98.11	96.53	97.95	96.85	97.16
2-nov		634	97.32	96.85	95.90	97.00	96.21	97.00
6-nov	Semana 6	634	97.32	97.00	96.85	98.11	98.26	96.69
9-nov		634	97.00	97.48	95.58	97.48	98.42	97.00
13-nov	Semana 7	634	98.11	98.42	96.53	98.42	98.58	97.95
16-nov		634	95.90	97.63	95.43	97.32	98.26	96.53
20-nov	Semana 8	634	96.69	97.16	95.58	96.69	97.63	95.58
23-nov		634	96.53	96.53	97.63	95.90	97.16	98.11
27-nov	Semana 9	634	96.85	97.00	93.38	96.06	96.85	95.74
30-nov		634	95.43	95.74	94.01	95.90	95.90	96.06
4-dic	Semana 10	634	95.90	98.74	97.32	94.01	92.43	92.27
7-dic		634	90.85	96.69	90.22	94.32	95.27	97.79
11-dic	Semana 11	634	94.95	96.85	90.69	97.63	96.37	97.16
14-dic		634	92.90	95.11	92.59	94.01	94.79	95.43
18-dic	Semana 12	634	94.64	97.16	88.80	94.79	95.11	96.53
21-dic		634	96.06	97.63	90.85	96.37	96.53	96.85
25-dic	Semana 13	634	97.32	97.95	92.74	97.79	97.95	97.16
28-dic		634	95.74	97.79	92.43	97.95	98.74	98.74
1-ene	Semana 14	634	98.58	98.74	94.16	98.90	98.74	99.05
4-ene		634	97.32	97.63	92.74	95.58	97.00	97.48
8-ene		634	95.27	95.74	91.32	95.58	96.21	95.11

11-ene	Semana 15	634	96.14	95.98	91.40	96.14	96.61	96.14
15-ene	Semana 16	634	97.00	96.21	91.48	96.69	97.00	97.16
18-ene		634	96.85	97.16	94.16	97.00	96.53	96.69
22-ene	Semana 17	634	96.06	96.21	90.22	91.64	94.79	93.85
25-ene		634	93.22	95.58	94.32	94.32	95.58	96.06

Elaborado por: Lomas, W.

Porcentaje de remoción de NT (%)

	SEMANA	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
30-oct	Semana 5	20.5	47.3	66.8	72.7	53.2	59.5	66.8
6-nov	Semana 6	20.5	60.5	56.1	77.6	61.0	47.3	64.4
13-nov	Semana 7	20.5	50.7	54.1	81.5	62.9	54.1	55.1
20-nov	Semana 8	20.5	50.2	57.6	82.0	59.5	49.8	82.9
27-nov	Semana 9	20.5	44.9	54.1	65.9	57.6	42.0	74.1
4-dic	Semana 10	20.5	47.7	51.0	62.0	54.1	46.6	59.6
11-dic	Semana 11	20.5	57.5	54.2	47.7	69.5	52.6	68.8
18-dic	Semana 12	20.5	51.7	51.7	43.9	54.4	48.3	61.6
25-dic	Semana 13	20.5	57.5	52.9	59.9	55.3	54.4	54.8
1-ene	Semana 14	20.5	57.0	52.8	52.3	53.3	52.0	53.7
8-ene	Semana 15	20.5	51.7	51.7	60.1	52.8	47.1	54.3
15-ene	Semana 16	20.5	50.4	51.4	48.3	63.0	39.0	54.6
22-ene	Semana 17	20.5	52.5	56.9	51.0	61.8	48.2	58.0

Elaborado por: Lomas, W.

Porcentaje de remoción de PT (%)

	SEMANA	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
30-oct	Semana 5	35.6	38.7	25.7	32.5	37.0	30.8	19.0
6-nov	Semana 6	35.6	31.9	28.6	36.4	34.7	31.9	44.9
13-nov	Semana 7	35.6	39.8	55.8	47.7	37.8	55.6	45.4
20-nov	Semana 8	35.6	17.9	56.4	33.9	23.5	51.6	57.8
27-nov	Semana 9	35.6	35.6	42.1	39.0	36.1	31.1	34.2
4-dic	Semana 10	35.6	32.8	41.7	37.9	33.8	40.2	40.3
11-dic	Semana 11	35.6	38.4	39.8	40.1	38.7	34.5	48.0
18-dic	Semana 12	35.6	34.7	40.6	35.6	38.1	39.5	57.0
25-dic	Semana 13	35.6	41.8	40.9	36.7	36.1	38.4	57.2
1-ene	Semana 14	35.6	44.0	44.9	37.3	42.9	38.1	65.4
8-ene	Semana 15	35.6	48.8	46.8	47.7	47.1	39.5	67.1
15-ene	Semana 16	35.6	37.8	67.1	41.8	39.8	38.7	65.4
22-ene	Semana 17	35.6	48.5	67.9	41.2	42.1	39.0	67.1

Sólidos

	SEMANA	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
Semana 1	ST	718	492	426	500	446	518	412
	ST fijos	236	206	192	208	244	226	240
	ST volátiles	482	286	234	292	202	292	172
	SST	134	34	160	180	58	60	60
Semana 2	ST	0	454	484	586	512	492	456
	ST fijos	0	212	212	210	210	212	216
	ST volátiles	0	242	272	376	302	280	240
	SST	0	28	74	126	46	62	50
Semana 3	ST	738	408	490	452	418	478	398

	ST fijos	236	228	274	224	242	248	238
	ST volátiles	502	180	216	228	176	230	160
	SST	176	6	50	44	24	-10	30
	ST	676	350	366	450	346	400	462
Semana 4	ST fijos	228	254	242	258	268	250	272
	ST volátiles	448	96	124	192	78	150	190
	SST	142	18	24	50	24	18	30
Semana 5	ST		244	272	240	300	284	338
	ST fijos		214	176	182	232	160	200
	ST volátiles		30	96	58	68	124	138
	SST		6	10	18	18	26	14
Semana 6	ST	582	266	258	254	252	238	282.2
	ST fijos	178	238	262	227	268	237	284
	ST volátiles	404	28	-4	27	-16	1	-1.8
	SST	46	2	6	2	2	2	20
Semana 7	ST		288	282	280	326	278	302
	ST fijos		202	212	204	230	218	222
	ST volátiles		86	70	76	96	60	80
	SST		-20	-10	10	-2	-14	4
Semana 8	ST	672	354	244	322	300	324	336
	ST fijos	154	222	158	198	214	228	218
	ST volátiles	518	132	86	124	86	96	118
	SST	90	-12	12	8	20	28	16
Semana 9	ST		346	256	256	278	236	214
	ST fijos		198	166	174	182	168	160
	ST volátiles		148	90	82	96	68	54
	SST		26	4	38	-16	-4	0
Semana 10	ST		270	234	266	248	294	316
	ST fijos		188	176	190	178	206	210
	ST volátiles		82	58	76	70	88	106

	SST		4	36	24	26	-18	-22
Semana 11	ST		258	350	290	340	314	268
	ST fijos		198	252	214	242	222	202
	ST volátiles		60	98	76	98	92	66
	SST		3	12	15	15	-8	-26
Semana 12	ST	752	272	342	346	358	378	284
	ST fijos	186	216	248	252	274	286	228
	ST volátiles	566	56	94	94	84	92	56
	SST	18	2	-12	6	4	2	-30
Semana 13	ST	728	350	360	358	411	433	318
	ST fijos	198	270	256	268	320	333	257
	ST volátiles	530	80	104	90	91	100	61
	SST	82	-3	-4	2	-10	-9	-30
Semana 14	ST	704	428	378	370	464	488	352
	ST fijos	210	324	264	284	366	380	286
	ST volátiles	494	104	114	86	98	108	66
	SST	146	-8	4	-2	-24	-20	-30
Semana 15	ST	848	520	324	384	156	364	370
	ST fijos	246	366	238	268	246	252	266
	ST volátiles	602	154	86	116	-90	112	104
	SST	146	7.1054E-11	-8	8	-16	-11	-16
Semana 16	ST		378	380	368	526	354	384
	ST fijos		272	284	268	354	244	292
	ST volátiles		106	96	100	172	110	92
	SST		8	-20	18	-8	-2	-2

Porcentaje de Remoción de SST (%)

	SEMANA	Afluente	Biofiltro 1	Biofiltro 2	Biofiltro 3	Biofiltro 4	Biofiltro 5	Biofiltro 6
30-oct	Semana 5	134	34	45	36	24	60	30
6-nov	Semana 6	176	28	74	76	46	62	50
13-nov	Semana 7	142	6	50	44	24	0	30
20-nov	Semana 8	128	18	24	50	24	18	30
27-nov	Semana 9	135	6	10	18	18	26	14
4-dic	Semana 10	105	2	6	2	2	2	20
11-dic	Semana 11	82	30	0	10	0	0	4
18-dic	Semana 12	146	40	12	8	20	28	16
25-dic	Semana 13	146	26	4	38	0	0	0
1-ene	Semana 14		4	36	24	26	0	0
8-ene	Semana 15		3	12	15	15	0	0
15-ene	Semana 16		2	0	6	4	2	0
22-ene	Semana 17		0	0	2	0	0	0

Elaboración: Lomas, W.