

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**EFICIENCIA DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR  
DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES PARA LA  
REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS  
RESIDUALES, CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2018.**

**AUTORA: Bach. Irina Ramirez Mas**

**ASESORES: Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres  
Dr. Manuel Emilio Milla Pino**

**Registro:.....**

**CHACHAPOYAS – PERÚ  
2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**EFICIENCIA DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR  
DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES PARA LA  
REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS  
RESIDUALES, CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2018.**

**AUTORA: Bach. Irina Ramirez Mas**

**ASESORES: Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres**

**Dr. Manuel Emilio Milla Pino**

**Registro:.....**

**CHACHAPOYAS – PERÚ  
2018**

## DEDICATORIA

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional,  
confianza, afecto y por sus buenos consejos para cumplir con  
mi meta.

Con gratitud a mis tíos, hermano y amigos que siempre me  
apoyaron en el transcurso de mi carrera.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis asesores, el Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres y el Dr. Manuel Emilio Milla Pino por su apoyo incondicional, por ser buenos educadores e investigadores y por sus valiosas sugerencias para realizar la presente tesis, también al Dr. Franz Zirena Vilca por inculcarnos el conocimiento y guía en la investigación.

A mis queridos padres Germán Ramirez Díaz y Rosa Isabel Mas Chasquibol, a mi hermano, tíos y abuelitos por su grandeza e inspiración para motivarme y seguir adelante para alcanzar todas mis metas trazadas.

A los miembros de mi Jurado de Tesis: Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, Dra. Cástula Alvarado Chuqui y M.Sc. Jaris Emmanuel Veneros Guevara por sus sugerencias, presteza y apoyo.

A todas las personas y amigos que me apoyaron durante la ejecución de mi tesis, asimismo al Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva por su apoyo para el análisis de las muestras.

**AUTORIDADES DE LA UNTRM**

**Dr. POLICARPIO CHAUCA VALQUI  
RECTOR**

**Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN  
VICERRECTOR ACADÉMICO**

**Dra. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN  
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN**

**Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES  
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

## **VISTO BUENO DEL ASESOR**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la tesis titulada **“EFICIENCIA DEL BIOCHAR A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES, CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2018”**, de la tesista de la escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

**Bach. IRINA RAMIREZ MAS**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el visto bueno al Informe Final de la Tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones.

Chachapoyas, 14 de Diciembre del 2018

---

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

Asesor

## **VISTO BUENO DEL ASESOR**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la tesis titulada “**EFICIENCIA DEL BIOCHAR A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES, CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2018**”, de la tesista de la escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

**Bach. IRINA RAMIREZ MAS**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el visto bueno al Informe Final de la Tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones.

Chachapoyas, 14 de Diciembre del 2018

---

Dr. Manuel Emilio Milla Pino  
Asesor

**JURADO EVALUADOR**

---

**Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN**

**Presidente**

---

**Dra. CÁSTULA ALVARADO CHUQUI**

**Secretaria**

---

**M.Sc. JARIS EMMANUEL VENEROS GUEVARA**

**Vocal**

## **DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO**

Yo, Irina Ramirez Mas, identificada con DNI N° 72944351, Egresada de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

### **DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:**

1. Soy autora de la Tesis titulada : **“EFICIENCIA DEL BIOCHAR A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES, CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2018”**, que presento para obtener el Título Profesional de **INGENIERA AMBIENTAL**.
2. La Tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La Tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La Tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. La información presentada es real y no sido falsificada, ni duplicada, ni copiada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la Tesis para obtener el Título Profesional, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para la UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado a las que encontraren causa en el contenido de la Tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente, asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

14 de diciembre de 2018

---

Irina Ramirez Mas



**ANEXO 3-N**

**ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL**

En la ciudad de Chachapoyas, el día 17 de DICIEMBRE del año 2018, siendo las 10:30 horas, el aspirante RAMIREZ MAS IRINA defiende en sesión pública la Tesis titulada: EFICIENCIA DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS MUNICIPALES PARA LA REMOCION DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES, CHACHAPOYAS, Amazonas, 2018

para obtener el Título Profesional de INGENIERA AMBIENTAL a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente : Dr. MIGUEL ANGEL BARRENA GURBILLÓN

Secretario : Dra. CÁSTULA ALVARADO CITUQUI

Vocal : M.Sc. JARIS EMMANUEL VENEROS GUEVARA

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado (  )                      Desaprobado (  )

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 11:20 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

SECRETARIO

VOCAL

PRESIDENTE

OBSERVACIONES: .....

## INDICE

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
AUTORIDADES DE LA UNTRM.....	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR.....	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR.....	v
JURADO EVALUADOR.....	vi
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO .....	vii
RESUMEN .....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	12
II. MATERIAL Y MÉTODOS .....	14
2.1. Zona de estudio .....	14
2.2. Materiales.....	15
2.3. Metodología .....	15
2.3.1. Selección de la materia orgánica .....	15
2.3.2. Recolección de la materia orgánica .....	16
2.3.3. Diseño y construcción del horno pirolítico.....	17
2.3.4. Producción del biochar .....	18
2.3.5. Acondicionamiento del biochar .....	21
2.3.6. Ensamblaje y construcción del filtro .....	21
2.3.7. Aplicación del biochar en el filtro .....	22
2.3.8. Análisis físico químico del agua residual .....	24
2.3.9. Análisis estadístico .....	24
III.RESULTADOS .....	25
3.1. Selección de la materia orgánica para la producción de biochar .....	25
3.2. Determinación de la carga orgánica del agua residual .....	29
3.3. Eficiencia del biochar en el tratamiento de aguas residuales.....	29
V. DISCUSIÓN .....	32
V. CONCLUSIONES .....	34
VI. RECOMENDACIONES .....	35
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación del punto de muestreo de agua residual. ....	14
<b>Figura 2.</b> Material orgánico seleccionado para la producción de biochar. a) Cáscara de camote. b) Cáscara de frijol. c) Cáscara de Yuca. d) Cáscara de frutas, huevos, tallos de repollo, cebolla. e) Tuza de maíz. f) Cáscara de alverja. ....	16
<b>Figura 3 .</b> Segregación de la materia orgánica sobre una manta de plástico. ....	17
<b>Figura 4.</b> Horno pirolítico de doble tambor. ....	17
<b>Figura 5.</b> Vistas del horno pirolítico. ....	18
<b>Figura 6.</b> Producción de biochar. a) Acondicionamiento del tambor interno. b) y c) Llenado de la cámara interna con materia orgánica. d) y e) Acondicionamiento con leña en el espacio entre las dos cámaras. f) Inicio de llama, cierre del dispositivo e inicio del proceso de pirólisis. g) Monitoreo del tambor interno cese a la producción de biochar. h) Extracción de la cámara interna. ....	20
<b>Figura 7.</b> Lavado del biochar. ....	21
<b>Figura 8.</b> Estructura del filtro de biochar de 20 L. ....	22
<b>Figura 9.</b> Colecta de muestra de agua residual. ....	23
<b>Figura 10.</b> Aplicación del tratamiento de agua residual. a) Preparación del filtro. b) Agua residual en el filtro. c) Tratamiento del agua residual. d) Obtención de la muestra del agua residual. filtrada. ....	23
<b>Figura 11.</b> Determinación de los parámetros del agua residual filtrada. ....	24
<b>Figura 12.</b> Proceso de la pirolisis a) Inicio de fuego. b) Liberación del contenido ..... 25	25
<b>Figura 13.</b> Muestras de biochar. a) Cáscara de cebolla. b) Cáscara de plátano. ....	27
<b>Figura 14.</b> Muestras representativas de biochar de papa, yuca, zanahoria, palta, mandarina y otros. ....	27
<b>Figura 15.</b> Muestra representativa de biochar de la tuza. ....	28
<b>Figura 16.</b> Poros del biochar de tuza de maíz ..... 28	28
<b>Figura 17.</b> Poros del biochar de cáscara de yuca ..... 29	29
<b>Figura 18.</b> Gráfico de remoción de DBO en el filtro de biochar. .... 30	30
<b>Figura 19.</b> Gráfico de remoción de DQO ..... 31	31
<b>Figura 20.</b> Eficiencia de remoción de DBO y DQO del filtro con biochar ..... 31	31

## RESUMEN

La materia orgánica municipal que se genera en las viviendas del Perú gran parte de estos residuos orgánicos no tienen un tratamiento adecuado, dentro de los residuos sólidos el 60% del total es materia orgánica, por lo que representa un bio recurso potencial para darle otros usos como el biochar. En este contexto se investigó la eficiencia del biochar, obtenido a partir de residuos orgánicos, para remover la materia orgánica del agua residual, para esto se produjo biochar mediante pirólisis a una temperatura 550 a 660 °C en un horno pirolítico de doble tambor. Para el tratamiento del agua residual de la quebrada Santa Lucía de la ciudad de Chachapoyas, se empleó un filtro cuyo componente principal fue el biochar, arena fina, arena gruesa y piedras de río. La eficiencia máxima del filtro con biochar en la remoción de materia orgánica de la aguas residuales de la quebrada de Santa Lucía fue de 75 % en remoción de DBO (en el experimento N° 2) y de 71 % de remoción de DQO (en el experimento N° 6), debido a que en dichos experimentos se utilizó un biochar con una composición de tuza de maíz de 90 y 45 % respetivamente. Los hallazgos de este estudio pueden ser mejorados ya que la eficiencia del biochar depende de la porosidad y de las características de la biomasa empleada para su síntesis.

**Palabras claves:** biochar, filtración de aguas residuales, pirolisis.

## **ABSTRACT**

The municipal organic matter that is generated in homes in Peru, a large part of this organic waste does not have an adequate treatment, within the solid waste 60% of the total is organic matter, so it represents a potential bio resource to give other uses like the biochar. In this context, the efficiency of biochar, obtained from organic waste, was investigated to remove the organic matter from the residual water, for which biochar was produced by pyrolysis at a temperature of 550 to 660 ° C in a double-drum pyrolytic furnace. For the treatment of wastewater from the Santa Lucía creek in the city of Chachapoyas, a filter was used whose main component was biochar, fine sand, coarse sand and river stones. The maximum efficiency of the biochar filter in the removal of organic matter from the wastewater of the Santa Lucía creek was 75% in BOD removal (in experiment N°. 2) and 71% removal of COD (in the experiment N°. 6), due to the fact that in these experiments a biochar with a corn gum composition of 90 and 45% was used respectively. The findings of this study can be improved since the efficiency of the biochar depends on the porosity and the characteristics of the biomass used for its synthesis.

**Keywords:** biochar, sewage filtration, pyrolysis.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se genera una gran cantidad de residuos sólidos por crecimiento poblacional, económico y un estilo de vida orientado al consumo excesivo (Taherymoosavi, Verheyen, Munroe, Joseph, & Reynolds, 2017). A medida que crece la urbanización, la cantidad de residuos sólidos municipales también se incrementa, incluso más rápido que la tasa de urbanización. Hace diez años se generaban alrededor de 0,68 mil millones de toneladas de residuos sólidos por año, hoy en día se genera 1,3 mil millones de toneladas por año. Para el año 2025, se estima que se generará 2,2 billones de toneladas por año (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

La gestión ambientalmente racional de los desechos municipales se ha convertido en un desafío mundial debido a la limitada disponibilidad de recursos, al aumento de la población, especialmente en los países en desarrollo, a una urbanización e industrialización sin precedentes e irreversibles. Varios países se han dado cuenta de la forma en que manejan sus desechos sólidos no satisface los objetivos del desarrollo sostenible (Ramachandra, Bharath, Kulkarni, & Han, 2018).

En el Perú, la generación de residuos sólidos municipales es aproximadamente de 7 millones toneladas por año, de los cuales 4 millones de toneladas son dispuestos en botaderos u otros destinos no identificados (Ministerio del Ambiente, 2017). Esta generación de residuos sólidos está provocando numerosos problemas ambientales (Taherymoosavi *et al.*, 2017), como por ejemplo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contaminación del agua y el suelo afectando a la flora, fauna y a la salud pública (Mia *et al.*, 2018). Además, el incorrecto manejo de los residuos orgánicos provoca malos olores, vectores, roedores y lixiviados que pueden contaminar a las fuentes de agua superficial y subterránea (Reddy & Nandini, 2011).

Para superar los problemas mencionados anteriormente, la valorización de los residuos es una opción técnica que se está impulsado en la actualidad (Zabaleta & Rodic, 2015, Xiao *et al.*, 2017). En este contexto la producción de biochar, el cual es obtenido por conversión termoquímica de biomasa, como residuos agrícolas, astillas de madera, estiércol y residuos sólidos municipales (Agegnehu, Srivastava, & Bird, 2017).

Las aplicaciones del biochar son muy diversas, desde la producción de calor y energía, limpieza de gases de combustión, aplicaciones metalúrgicas, uso en agricultura y cría de animales, material de construcción, para uso médico. Por ello, el biochar ha atraído un gran interés científico para aplicaciones agrícolas y medioambientales ya que tiene propiedades ventajosas para la reducción de la contaminación del suelo y agua (Vikrant *et al.*, 2018). El biochar se caracteriza por una gran superficie específica, porosidad, cantidad de grupos funcionales y fácil obtención (Godlewska, Schmidt, Ok, & Oleszczuk, 2017), por lo cual, el biochar se puede usar como un adsorbente de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales (Oliveira *et al.*, 2017).

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la eficiencia del biochar obtenido a partir de residuos orgánicos municipales para la remoción de materia orgánica en aguas residuales, Chachapoyas, Amazonas, 2018.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

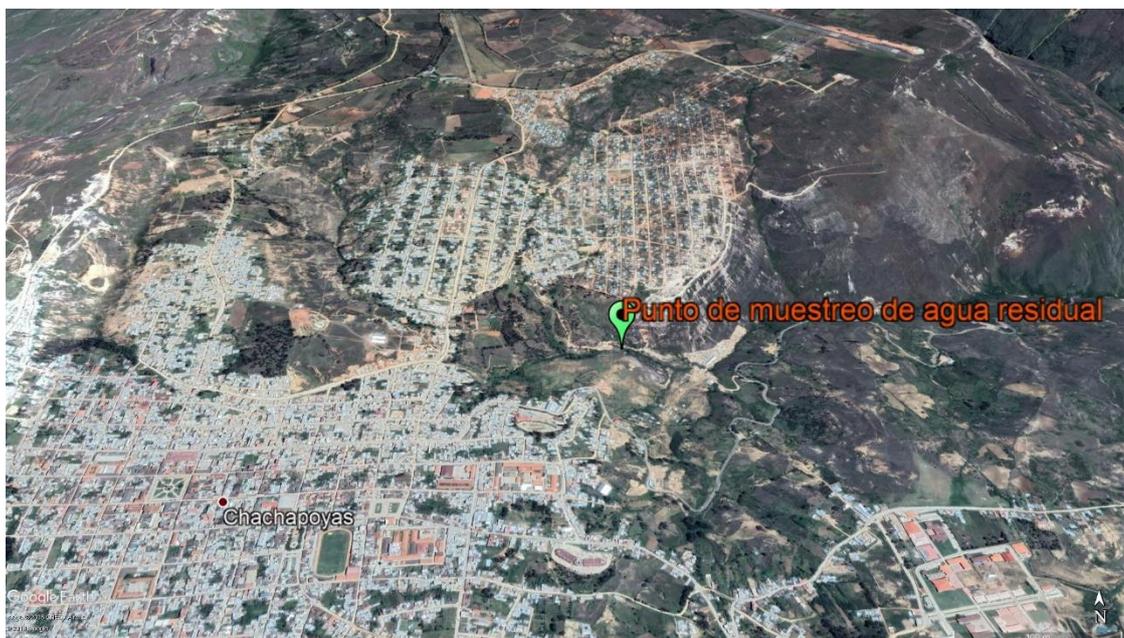
### 2.1. Zona de estudio

Se caracterizó los residuos orgánicos municipales que produce una vivienda en la ciudad de Chachapoyas con coordenadas  $6^{\circ}13'57.38''S$  y  $77^{\circ}51'34.30''$  para conocer la cantidad de desechos orgánicos que generan, los que se pueden emplear para producir biochar.

La producción y empleo del biochar se llevó a cabo en espacio abierto, cerca de la disposición del abastecimiento de la materia orgánica.

Los análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Agua (LABISAG) del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva, perteneciente a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

En la Figura 1 se observa la ubicación del punto de muestreo del agua residual con coordenadas  $6^{\circ}13'25.08''S$  y  $77^{\circ}51'40.59''O$  de la quebrada de Santa Lucía en la ciudad de Chachapoyas.



**Figura 1.** Ubicación del punto de muestreo de agua residual.

## **2.2. Materiales**

Se utilizaron los siguientes materiales de campo: sacos de polietileno de 50 kg, hacha, machete, ron de quemar, madera, fósforos, lapiceros, libreta de apuntes.

Se utilizaron los siguientes materiales de laboratorio: papel de filtro, envases de plástico, guantes, mascarillas, guardapolvo, vasos de precipitación de 100 mL, probetas 100 Ll, botellas Winkler de color ámbar de 250 Ll, fiola de 50mL.

Los equipos usados en campo fueron: horno pirolítico, balanza tipo romana de 5 kg de capacidad, cámara fotográfica, GPS.

Los equipos usados en el laboratorio fueron el oxímetro, reactor de DQO, micropipeta de 5 uL, aireador e incubadora.

## **2.3. Metodología**

### **2.3.1. Selección de la materia orgánica**

Con las inspecciones hechas a los residuos sólidos de la vivienda y la revisión bibliográfica realizada al Estudio de caracterización de residuos sólidos de Chachapoyas 2012; el tipo de residuo que más se genera es del tipo orgánico en un 68,60%, el que está compuesto principalmente por:

- ✓ Cáscara de papa, yuca, plátano, piña, mandarina; restos de arroz, tomate, cáscara de huevos, de limón, y de cebolla.
- ✓ Cáscaras de frijol, arveja, tallo de repollo, tuza de maíz, trozos de yuca deteriorada.

Al recoger sus residuos orgánicos de la vivienda se encontró los siguientes tipos de materia orgánica como se puede ver la figura 2.



**Figura 2.** Material orgánico seleccionado para la producción de biochar. a) Cáscara de camote. b) Cáscara de frijol. c) Cáscara de Yuca. d) Cáscara de frutas, huevos, tallos de repollo, cebolla. e) Tuza de maíz. f) Cáscara de alverja.

### 2.3.2. Recolección de la materia orgánica

En la vivienda, la cantidad de materia orgánica recolectada dependía de la generación de esta. Se recogió 4 kg de materia orgánica fresca, luego se colocó en un lugar bajo techo a temperatura ambiente por 5 días para reducir la humedad antes de ponerla en el horno pirolítico.



**Figura 3** . Segregación de la materia orgánica sobre una manta de plástico.

### 2.3.3. Diseño y construcción del horno pirolítico

Se diseñó el horno pirolítico para producir biochar en pequeñas cantidades, compuesto por dos tambores cilíndricos. La capacidad del horno fue de 4 a 5 kg de biomasa, en base al modelo construido por la Empresa Construcciones Metálicas S.A. En la Figura 4 se observa una imagen del horno hecho en base a láminas acero inoxidable.



**Figura 4**. Horno pirolítico de doble tambor.

Componentes y dimensiones del horno pirolítico:

- Un tambor cilíndrico pequeño: es la cámara interna del horno y sus dimensiones son de 20 cm de diámetro y 30 cm de alto, con volumen

de 9425 cm<sup>3</sup>, con una capacidad de 4 - 5 kg, dependiendo de la densidad de la materia orgánica, este cilindro era completamente cerrado con una tapa del mismo material, para obtener una muestra de biochar sin contaminaciones.

- Un tambor cilíndrico grande: es la cámara para combustión externa que contiene al tambor cilíndrico pequeño. Sus dimensiones son 50 cm de diámetro y 50 cm de alto con un volumen de 0,4 m<sup>3</sup>. Se perforó orificios en las paredes del tambor grande, a la altura de su base, en el centro y cerca al borde superior (Figura 4 y 5). En la tapa se hizo perforaciones como se puede observar en la Figura 5 para la ventilación del horno. Además estaba incorporada en la tapa del tambor grande, un tubo del mismo material, acondicionado para la chimenea de ventilación de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.



**Figura 5.** Vistas del horno pirolítico.

#### **2.3.4. Producción del biochar**

Las muestras de residuos orgánicos recolectados y parcialmente secos, fueron mezclados y posteriormente se pesó cada tipo de materia orgánica antes de colocarlos en el cilindro pequeño. A continuación se detallan los pasos:

- Por cada producción de biochar se controlaron las entradas del aire para ambos tambores, ya que el proceso de pirólisis se lleva a cabo con oxígeno limitado, también se tuvo en cuenta al cilindro que contenía la muestra donde se realizó la producción del biochar (Figura 6a).

- Se colocó aproximadamente 4 kg de materia orgánica como son cáscaras de papa, frijol, tuza, yuca, tomates, limón, etc. Después se llenó completamente sin compactar el tambor interno, luego se aseguró con la tapa, verificando una salida de gases (Figura 6b y 6c).
- El espacio entre los dos tambores fue llenado con materiales combustibles como son leña, ramas secas, bagazo, entre otros. Una vez colocado todo, se roció con ron de quemar y de prendió fuego al material combustible cuidadosamente, para iniciar la pirólisis (Figura 6d y 6e).
- Durante el proceso de pirólisis se vigiló constantemente para obtener un buen biochar (Figura 6f y 6g).
- El proceso de pirólisis duró aproximadamente 2 a 2,5 horas y el proceso de enfriamiento aproximadamente 3 horas, luego se retiró la cámara interna con biochar resultante (Figura 6h).
- Finalmente se repitió 7 veces el proceso para obtener 7 kg de biochar, ya que por cada 4 kg de materia orgánica se obtenía 1 kg de biochar.



**Figura 6.** Producción de biochar. a) Acondicionamiento del tambor interno. b) y c) Llenado de la cámara interna con materia orgánica. d) y e) Acondicionamiento con leña en el espacio entre las dos cámaras. f) Inicio de llama, cierre del dispositivo e inicio del proceso de pirólisis. g) Monitoreo del tambor interno cese a la producción de biochar. h) Extracción de la cámara interna.

### 2.3.5. Acondicionamiento del biochar

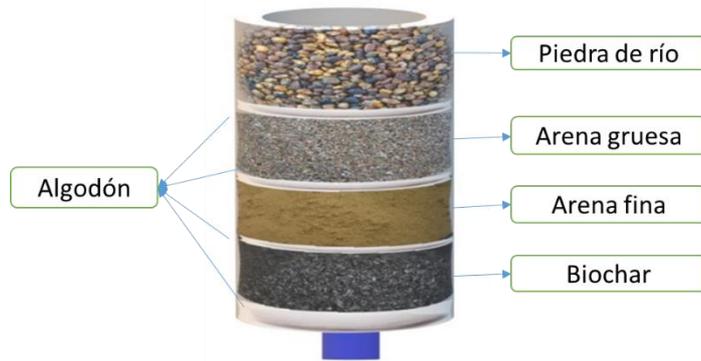
El biochar obtenido se lavó con agua destilada, empleando aproximadamente 15 litros de agua para un kilogramo de biochar; con la finalidad eliminar las sustancias de color oscuro adheridas al biochar. Asimismo, se lavó los demás materiales que conformaron el filtro como son la arena, grava y piedra del río, días antes para secarlos a temperatura ambiente.



**Figura 7.** Lavado del biochar.

### 2.3.6. Ensamblaje y construcción del filtro

Se ensambló un filtro casero para tratar el agua residual de la quebrada Santa Lucía, con la finalidad de reducir la materia orgánica. Para el ensamble del filtro se utilizó una botella de Policarbonato de 20 L, con las siguientes dimensiones internas: diámetro de 26 cm y altura de 42 cm. En su interior se conformó un lecho filtrante compuesto por 5 capas: una en el fondo de 5 cm de algodón, luego una de 10 cm de biochar que pesaba 1 kg, encima 5 cm de arena fina, 5 cm de arena gruesa, 6 cm de piedra de río de 1". Sobre la capa superior se colocó una tela coladera que retuvo la mayoría de partículas gruesas.



**Figura 8.** Estructura del filtro de biochar de 20 L.

### **2.3.7. Aplicación del biochar en el filtro**

Se utilizó el agua residual de la quebrada Santa Lucía para probar el filtro de biochar, se vertió el agua residual en el filtro, el agua pasó a través de las diferentes capas, quedando atrapados los sólidos que estaban suspendidos, esto conllevó a que el agua que sale por el fondo del filtro esté más limpia que la ingresó.

En la operación de filtración se observó que la función de la tela coladera fue impedir el paso de partículas grandes, sin embargo las partículas de menor tamaño lograron pasar debido a que su entretejido no es lo suficientemente estrecho.

#### **A. Toma de muestras**

Para el análisis de DBO y DQO se extrajo muestras de 250 mL de agua residual de la quebrada Santa Lucía, que fue envasada en recipientes de plástico PET. Se recogió una muestra de agua residual por día, del mismo punto y fueron entregadas al laboratorio LABISAG.



**Figura 9.** Colecta de muestra de agua residual.

### **B. Tratamiento del agua residual en el filtro con biochar**

Se recolectó 20 litros de agua residual para filtrarla en el filtro con biochar estructurado como se muestra en la Figura 8. El caudal de alimentación del filtro fue de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que los 20 L se filtraron en 4 minutos. Del filtrado se obtuvo una muestra para el análisis de DBO y DQO.



**Figura 10.** Aplicación del tratamiento de agua residual. a) Preparación del filtro. b) Agua residual en el filtro. c) Tratamiento del agua residual. d) Obtención de la muestra del agua residual.

### 2.3.8. Análisis físico químico del agua residual

Se realizó el análisis físico químico en el Laboratorio LABISAG de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, de acuerdo al Método 8043\*; HACH: Dilución. Aceptado por la USEPA (Agencia para la protección del Ambiente de EE.UU.) para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno. También se determinó la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Método 8000\*; HACH: Digestión de Reactor).



**Figura 11.** Determinación de los parámetros del agua residual filtrada.

### 2.3.9. Análisis estadístico

Para determinar la eficiencia del tratamiento con la comparación de la Demanda Biológica de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua filtrada por el biochar hecho en base a los residuos orgánicos municipales, se aplicó la prueba T de Student (95% de confianza) para cada variable. Los cálculos se realizaron en el programa estadístico Statistix 8.0. La eficiencia de la eliminación de contaminantes se calculó con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{V_{INICIAL} - V_{FINAL}}{V_{INICIAL}} * 100$$

Donde:

$V_{INICIAL}$ = valor inicial del agua residual sin la aplicación del filtro con biochar

$V_{FINAL}$ = valor final del agua residual con la aplicación del filtro con biochar

### III.RESULTADOS

#### 3.1. Selección de la materia orgánica para la producción de biochar

Las muestras de biochar fueron producidas a partir de 4 kg de residuos sólidos orgánicos, en 2 a 2,5 horas mediante el proceso de pirólisis en el horno pirolítico de doble tambor diseñado para producir pequeñas cantidades, a una temperatura de 550 a 660 °C.

Durante la producción del biochar, a los 15 minutos de iniciado el fuego, el material combustible se encontró ardiendo con una llama de color naranja (Figura 12a). Luego el fuego abarco todo el combustible contenido en el tambor grande del horno, reduciéndose la humedad que contenían los residuos orgánicos la cual salió como vapor. La cantidad residuos sólidos orgánicos y el tiempo para producir biochar dependieron del contenido de humedad de cada materia prima al momento de empezar (Figura 12b); posteriormente, dependiendo del contenido y cantidad, la biomasa ubicada en el cilindro más grande empezó a arder a los 20 minutos aproximadamente del inicio del proceso, a partir de ese momento se liberaron gases de condensable y no condensables y la flama se tornó color azul acompañada con menor cantidad de humo, como indicio de combustión completa (Figura 12c).



**Figura 12.** Proceso de la pirólisis a) Inicio de fuego. b) Liberación del contenido de humedad. c) Liberación de flama azul.

A continuación se describe el porcentaje de residuos orgánicos que se utilizó en la producción de biochar.

**Biochar 1:** cascara de camote (20 %), cáscara de plátano (20 %), yuca (15 %), cáscara de mandarina (10 %), papa (10 %), zanahoria (10 %), tallo de repollo (10 %) y otros (5 %).

**Biochar 2:** tuza de maíz (90 %) y cáscara de frijol (10 %)

**Biochar 3:** cáscara de frijol (20 %), cáscara de arveja (20 %), cáscara de camote (20 %), tuza de maíz (10 %), cáscara de palta (10 %), cáscara de piña (10 %) y otros (10 %).

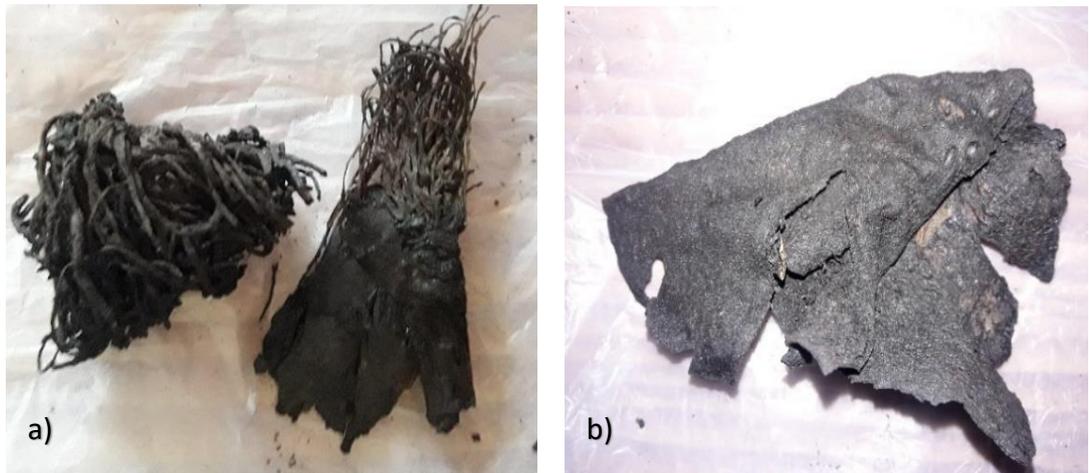
**Biochar 4:** cáscara de frijol (40 %), cáscara de yuca (15 %), cáscara de camote (15 %), cáscara de plátano (10 %) y otros (20 %).

**Biochar 5:** tuza de maíz (20 %), cáscara de zanahoria (15 %), cáscara de cebolla (15 %), cáscara de frijol (15 %), cáscara de arveja (15 %) y otros (20%)

**Biochar 6:** tuza de maíz (45 %), tallo de repollo (15 %), cáscara de plátano (15%), cáscara de zanahoria (10 %), cáscara de piña (10 %) y cáscara de mandarina (5 %).

**Biochar 7:** cáscara de arveja (40 %), cáscara de frijol (15 %), cáscara de yuca (10 %), cáscara de papa (10 %) y otros (25 %)

El biochar resultante conserva la forma y tamaño de su materia prima original como se observa en las Figuras 13,14 y 15; sin embargo, otras materias orgánicas como la cáscara de frijol, arveja y de residuos de menor consistencia estructural, no conservaron la forma y resultó un biochar pulverizado.



**Figura 13.** Muestras de biochar. a) Cáscara de cebolla. b) Cáscara de plátano.



**Figura 14.** Muestras representativas de biochar de papa, yuca, zanahoria, palta, mandarina y otros.

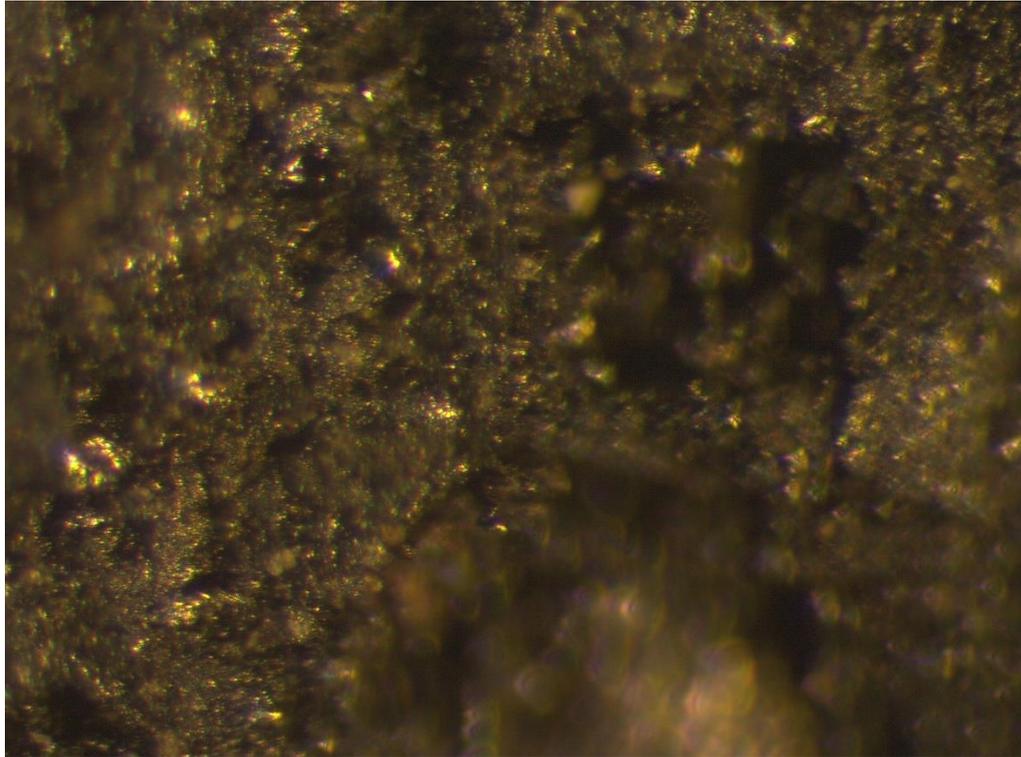


**Figura 15.** Muestra representativa de biochar de la tuza.

Al biochar de la cáscara de yuca y tuza de maíz se realizó una observación de poros a través de estereoscopio (SteREO very.V12) con una magnitud de 160.0 X y field (campo de observación) de 1.6 mm; donde el biochar de la tuza de maíz (Figura 16) es más poroso que el biochar de cascara de yuca (Figura 17).



**Figura 16.** Poros del biochar de tuza de maíz



**Figura 17.** Poros del biochar de cáscara de yuca

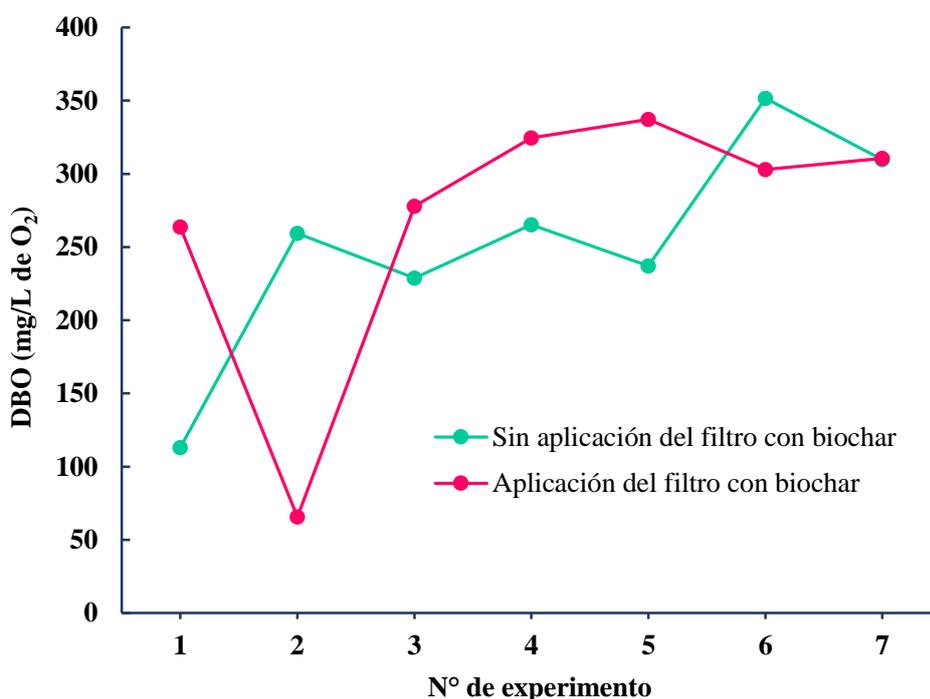
### **3.2. Determinación de la carga orgánica del agua residual**

Se realizó en agosto y septiembre un monitoreo de la calidad de aguas residuales en el LABISAG. Esta agua residual proviene en su mayoría del uso de los baños, por lo cual, está ligada a un uso más intensivo. Estas aguas contienen un valor promedio de 252,1 mg de O<sub>2</sub> /100 mL de Demanda Bioquímica Oxígeno sus valores se encuentran en un rango de 113 mg de O<sub>2</sub> /100 mL a 265.3 mg de O<sub>2</sub> /100 mL y el promedio de la Demanda Química de Oxígeno es 109,12 mg de O<sub>2</sub> /100 mL y sus valores se encuentran en un rango de 20.16 mg de O<sub>2</sub> /100 mL a 408 mg de O<sub>2</sub> /100 mL.

### **3.3. Eficiencia del biochar en el tratamiento de aguas residuales**

Luego del tratamiento del agua residual mediante el filtro con biochar, las muestras de agua filtrada se analizaron en el LABISAG de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, los resultados se muestran mediante el gráfico de la Figura 18, en la que se observa que en 5 días no hay reducción de la DBO después de la filtración del agua residual, excepto

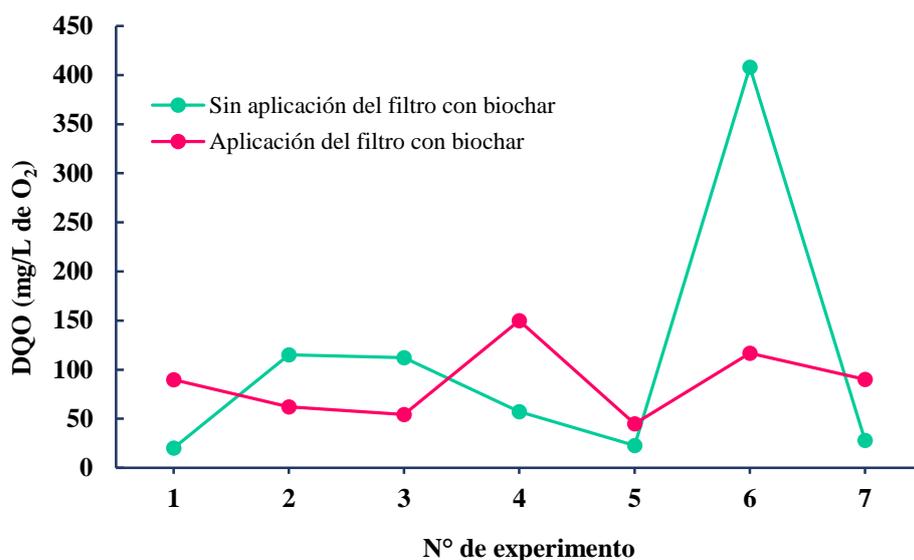
el día 2 y 6, en el día 2 el valor inicial sin aplicación del filtro con biochar es 259.4 mg/L y el valor final es 65.7mg/L, entonces en este día si hubo remoción del DBO al 75%, igualmente sucede con el día 6 el porcentaje de remoción que figura es del 14%, el cual estos dos días si están por debajo del valor que es de 100mg/L que dicta el Límite Máximo Permisible del Ministerio del Ambiente para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. El promedio de la DBO en los siete días es 268,97 mg/L, valor que sobrepasa del Límite Máximo Permisible de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas, con un 95 % confianza.



En

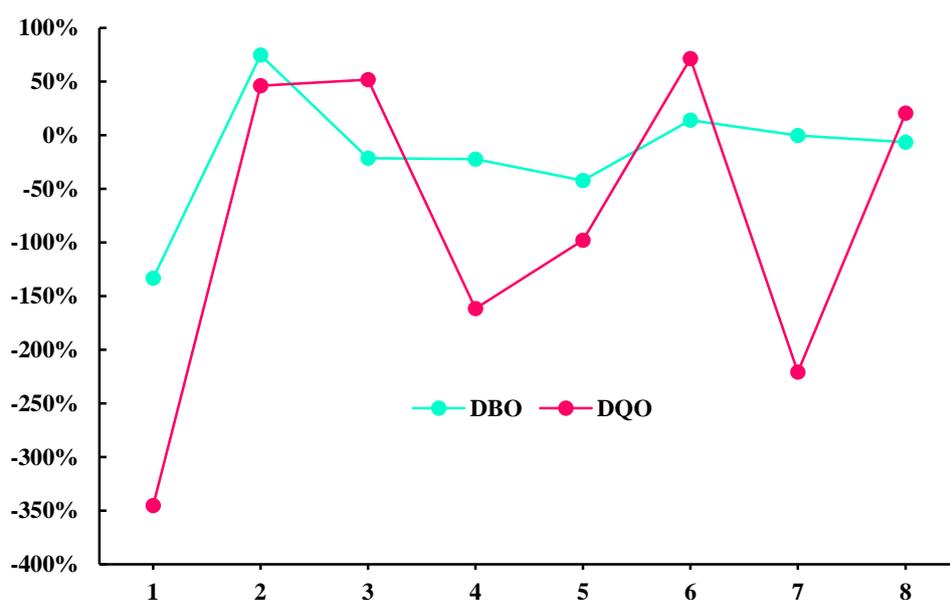
**Figura 18.** Gráfico de remoción de DBO en el filtro de biochar.

En la Figura 19 se observa el gráfico de remoción de la DQO sin y con aplicación del filtro con biochar, que hubo remoción en el día 2 y 6 para la DQO en la Figura 18, el valor inicial de la DQO sin la aplicación del filtro con biochar del día 2 es 115.3 mg/L y valor final con aplicación del filtro con biochar es 62.16 mg/L, el día 2 también hubo remoción para la DQO con 46%, el día 3 se observó una remoción con un porcentaje de 52%, asimismo sucedió con el día 6, se muestra en grafico 19 que si hubo remoción al 71%, al inicio tuvo un valor de 408 mg/ L sin aplicación del filtro con biochar y un valor final después de la aplicación del filtro con biochar de 116.7 mg/L.



**Figura 19.** Gráfico de remoción de DQO

En la Figura 20, se muestra la eficiencia de remoción de DBO y DQO del filtro con biochar donde en las repeticiones 2 y 6 han tenido valores positivos de DBO (75 % y 14 %) y DQO (46 % y 71 %) respectivamente, también se observa que la variable DBO tuvo menos días de remoción que la variable DQO, en una relación de 2 a 3 días. Por esa razón la variable donde mejor removió la materia orgánica el filtro con biochar fue en la Demanda Química de Oxígeno.



**Figura 20.** Eficiencia de remoción de DBO y DQO del filtro con biochar

## V. DISCUSIÓN

Los datos obtenidos en esta investigación permiten realizar un análisis de la eficiencia de la aplicación del filtro de biochar, que se realizó a nivel de laboratorio, el cual demostró que las características físicas de la materia orgánica es un factor determinante en la depuración de la misma, como se puede ver en la Figura 20 que la aplicación del filtro biochar para el agua residual no fue eficiente para remover la materia orgánica los 7 días, sin embargo como se puede observar en la Figura 18 y 19 hay 2 días en la que se realiza el efecto de remoción tanto de la DBO y DQO con un porcentaje remoción aceptable para el Límite Máximo Permisible para las PTAR, esto se debe que en esos días se colocó más biochar de tuza de maíz (presenta mayor porosidad y área superficial en consecuencia tiene mayor capacidad de retención) que de los otros biochar. Asimismo los resultados de la DBO evidencian una similitud antes y después de la aplicación del filtro de biochar en los 5 días, algunos valores más altos que otros, por lo que no se encuentra una diferencia significativa a la aplicación, pues aún falta acoplar o modificar al biochar para tener una remoción eficiente de la materia orgánica.

Al realizar un análisis de ambos parámetros, DQO y DBO, se comprueba que el filtro de biochar con arena no alcanza la remoción esperada de la materia orgánica, debido a que el agua residual debe aún pasar por un pre tratamiento antes de ser pasado por el filtro de biochar, ya que el bajo rendimiento puede deberse fundamentalmente a la estructura de la materia orgánica, porque al carbonizar una cáscara de papa pierde la forma durante el proceso de pirolisis, sin embargo si lo comparamos con un biochar producido de madera de maple o arce que son una innovación para tratar los efluentes con altas cargas de DBO, existe una gran diferencia debido a la baja área de superficie y tamaño del poro (Barber *et al.*, 2018), además la calidad del biochar depende de las características de la biomasa para su síntesis, por ello es importante destacar en esta investigación que no se descarta el uso para otras actividades como la agricultura o para evaluar su efecto sobre los demás parámetros físicos y químicos del agua residual (Lee, Cheng, Wong, & Wang, 2018).

De los resultados de esta investigación, se aprecia que las propiedades físicas del biochar se vieron más afectadas por los tipos de residuos agrícolas empleados, por

ejemplo; según estudios anteriores se estableció que los residuos de alimentos vegetales tienen una área de superficie más baja (2–70 m<sup>2</sup>/g) mientras que los materiales leñosos tienen un área de superficie relativamente mayor (200–380 m<sup>2</sup>/g), sin embargo el biochar derivado de la biomasa orgánica tuvo un rendimiento y un contenido de carbono relativamente bajo en comparación con el de la biomasa de madera, lo contrario sucede con las propiedades químicas del biochar orgánico que son relativamente mejores que las de los biochar de madera. Así la capacidad de retención de sustancias orgánicas depende de la materia prima según un estudio realizado por Liao, Liu, Li, & Li, (2018).

Otro aspecto diferente que se encontró es que para tener una capacidad de adsorción del biochar de tuza de maíz, se debe realizar a diferentes temperaturas de pirólisis como por ejemplo (350 °C, 450 °C y 550 °C) para poder ser modificado con otros compuestos químicos para mejorar la adsorción (Luo *et al.*, 2018). Por otro lado, el biochar puede tener alta área de superficie, arquitectura flexible y alta porosidad para la reducción de la contaminación; sin embargo, el biochar tiene ciertos inconvenientes por ejemplo, capacidad limitada de adsorción para los aniones y propiedades mecánicas deficientes que limitan su aplicabilidad práctica (Vikrant *et al.*, 2018).

La aplicación del biochar convencional para la inmovilización y eliminación de contaminantes necesitan mejoras adicionales. Por lo tanto, se debe centrar la atención en futuras investigaciones para modificar el biochar con nuevas estructuras y propiedades de superficie para mejorar su eficacia de remediación y los beneficios ambientales (Upamali *et al.*, 2016). Sin embargo, para el futuro, el biochar sigue siendo un carbón prometedor para la remoción de materia orgánica, ya que muchas investigaciones tienen éxito para el tratamiento de aguas residuales. La experimentación es crucial para mejorar la sostenibilidad de la producción de alimentos, la incorporación del biochar es esencial para optimizar la sostenibilidad ambiental y económica de los residuos orgánicos (Dalahmeh, Ahrens, Gros, Wiberg, & Pell, 2018).

## V. CONCLUSIONES

- ✓ La composición de los residuos orgánicos generados en la vivienda influyó en la eficiencia de remoción de materia orgánica del agua residual de la quebrada de Santa Lucía, ya que, el tipo de consistencia y estructura de los residuos son parámetros que influyen en la porosidad del biochar.
- ✓ La eficiencia máxima del filtro con biochar en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la quebrada de Santa Lucía fue de 75 % en remoción de DBO (en el experimento N° 2) y de 71 % de remoción de DQO (en el experimento N° 6), debido a que en dichos experimentos se utilizó un biochar con una composición de tuza de maíz de 90 y 45 % respectivamente.
- ✓ La producción de biochar es una alternativa sostenible de revaloración de residuos orgánicos domiciliarios, además, puede ser utilizado como medio de tratamiento para la remoción de materia orgánica de las aguas residuales urbanas, combinado con otras técnicas de tratamiento de aguas residuales.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- ✓ Se recomienda hacer un sistema de filtro más tecnificado, usar biopelículas activas para poder remover la materia orgánica.
- ✓ En las próximas investigaciones usar catalizadores preparados que pueden reutilizarse para ciclos sucesivos, ya que los materiales del catalizador son altamente estables según la calidad del biochar.
- ✓ Realizar la producción de biochar podría potencialmente ayudar a los fabricantes de alimentos y bebidas a reducir de manera sostenible sus huellas de carbono y agua.
- ✓ Utilizar el biochar como soporte poroso en las técnicas de procesos oxidación avanzadas en el tratamiento de aguas residuales

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119(April), 156-170. doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008
- Barber, S. T., Yin, J., Draper, K., Trabold, T. A., Barber, S. T., Yin, J., Trabold, T. A. (2018). Closing Nutrient Cycles with Biochar- From Filtration to Fertilizer. *Journal of Cleaner Production*. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.136
- Dalahmeh, S., Ahrens, L., Gros, M., Wiberg, K., & Pell, M. (2018). Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. *Science of the Total Environment*, 612, 192-201. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.178
- Godlewska, P., Schmidt, H. P., Ok, Y. S., & Oleszczuk, P. (2017). Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. *Bioresource Technology*, 246(May), 193–202. doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.095
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management. *Banco Mundial*.
- Lee, D.-J., Cheng, Y.-L., Wong, R.-J., & Wang, X.-D. (2018). Adsorption removal of natural organic matters in waters using biochar. *Bioresource Technology*. doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.016
- Liao, A. F., Liu, Y., Li, Q., & Li, Y. (2018). SC. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.001
- Luo, M., Lin, H., Li, B., Dong, Y., He, Y., & Wang, L. (2018). A novel modification of lignin on corncob-based biochar to enhance removal of cadmium from water. *Bioresource Technology*. doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.075
- Mia, S., Uddin, M. E., Kader, M. A., Ahsan, A., Mannan, M. A., Hossain, M. M., & Solaiman, Z. M. (2018). Pyrolysis and co-composting of municipal organic waste in Bangladesh: A quantitative estimate of recyclable nutrients, greenhouse gas emissions, and economic benefits. *Waste Management*. doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.01.038
- Ministerio del Ambiente. (2017). PERÚ LIMPIO PERÚ NATURAL APROBACIÓN DE LOS INSTRUCTIVOS 2017.

- OEFA. (2015). Fiscalizacion ambiental en residuos solidos de gestion municipal, 100. Retrieved from [webmaster@oefa.gob.pe](mailto:webmaster@oefa.gob.pe)
- Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., Lu, H., & Khanal, S. K. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, *246*, 110–122. doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.08.122
- Ramachandra, T. V., Bharath, H. A., Kulkarni, G., & Han, S. S. (2018). Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 1122–1136. doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.085
- Reddy, P., & Nandini, N. (2011). Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, *10*, 415–418. doi.org/10.1007/s10661-006-1505-7
- Taherymoosavi, S., Verheyen, V., Munroe, P., Joseph, S., & Reynolds, A. (2017). Characterization of organic compounds in biochars derived from municipal solid waste. *Waste Management*, *67*, 131–142. doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.05.052
- Upamali, A., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Sik, Y. (2016). Chemosphere Engineered / designer biochar for contaminant removal / immobilization from soil and water : Potential and implication of biochar modification. *Chemosphere*, *148*, 276-291. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.043
- Vikrant, K., Kim, K.-H., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Tsang, Y. F., Giri, B. S., & Singh, R. S. (2018). Engineered/designer biochar for the removal of phosphate in water and wastewater. *Science of The Total Environment*, *616–617*, 1242–1260. doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.193
- Xiao, R., Awasthi, M. K., Li, R., Park, J., Pensky, S. M., Wang, Q., Zhang, Z. (2017). Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review. *Bioresource Technology*, *246*, 203–213. doi.10.1016/J.BIORTECH.2017.07.090
- Zabaleta, I., & Rodic, L. (2015). Recovery of essential nutrients from municipal solid waste – Impact of waste management infrastructure and governance aspects. *Waste Management*, *44*, 178–187. doi.10.1016/J.WASMAN.2015.07.033