



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

**CARRERA MEDIO AMBIENTE**

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

**MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:**

**EVALUACIÓN DE CARGA ORGÁNICA PARA EFLUENTES  
RESIDUALES EN LA DESTILERÍA DE ALCOHOL CON EL  
FILTRO PERCOLADOR AÉROBICO UTILIZANDO PUMITA**

**AUTOR**

**FREDDY STEVEN SOLORZANO VARGAS**

**TUTOR:**

**JULIO LOUREIRO SALAVARRÍA, Mg**

**CALCETA, ABRIL 2019**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

Freddy Steven Solorzano Vargas, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su reglamento.

.....  
**FREDDY STEVEN SOLORZANO VARGAS**

## **CERTIFICACIÓN DE TUTOR**

**ING. JULIO LOUREIRO SALAVARRÍA, Mg**, certifica haber tutelado el proyecto **EVALUACIÓN DE CARGA ORGÁNICA PARA EFLUENTES RESIDUALES EN LA DESTILERÍA DE ALCOHOL CON EL FILTRO PERCOLADOR AÉROBICO UTILIZANDO PUMITA**, que ha sido desarrollada por **FREDDY STEVEN SOLORZANO VARGAS**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

.....  
**ING. JULIO LOUREIRO SALAVARRÍA, Mg**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL**

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DE CARGA ORGÁNICA PARA EFLUENTES RESIDUALES EN LA DESTILERÍA DE ALCOHOL CON EL FILTRO PERCOLADOR AÉROBICO UTILIZANDO PUMITA**, que ha sido propuesto, desarrollado por **FREDDY STEVEN SOLORZANO VARGAS**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

.....  
ING. CARLOS R. DELGADO VILLAFUERTE, Mg.  
**MIEMBRO**

.....  
ING. JORGE B. CEVALLOS BRAVO, Mg.  
**MIEMBRO**

.....  
ING. CARLOS R. VILLAFUERTE VÉLEZ, Mg.  
**PRESIDENTE**

## **AGRADECIMIENTO**

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda de muchas personas que me han prestado a lo largo del proceso de investigación. En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres que me han ayudado y apoyado en toda mi carrera universitaria, a mi tutor Julio Salavarría, por haberme orientado en todos los momentos que necesite sus consejos

A todos mis amigos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me dio la oportunidad de crecer como ser humano a través de una educación superior de calidad y en la cual he forjado mis conocimientos profesionales día a día.

.....  
**FREDDY STEVEN SOLORZANO VARGAS**

## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener unos de mis anhelos más deseados

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y en convertirme lo que soy. He sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres del mundo.

A mis hermanos por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral que siempre me han brindado a lo largo de mi vida.

A todas esas personas que me han apoyado y han hecho que le trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me compartieron sus conocimientos como mi nueva mama y mi tutor

.....  
**FREDDY STEVEN SOLORZANO VARGAS**

## CONTENIDO

DERECHOS DE AUTORÍA .....	ii
CERTIFICACIÓN DE TUTOR .....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
CONTENIDO .....	vii
RESUMEN.....	x
PALABRAS CLAVE .....	x
ABSTRACT.....	xi
KEY WORDS:.....	xi
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES</b> .....	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. HIPÓTESIS.....	4
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1. OBTENCIÓN DE ALCOHOL DE FORMA INDUSTRIAL .....	5
2.2. PLANTAS DESTILADORAS ARTESANALES DE ALCOHOL .....	6
2.3. PROCESOS PARA LA OBTENCION DE ALCOHOL ARTESANAL DE LA CAÑA DE AZUCAR .....	7
2.3.1. EXTRACCIÓN DE JUGO DE CAÑA.....	7
2.3.2. FERMENTACIÓN.....	7
2.3.3. DESTILACIÓN.....	7
2.4. RESIDUOS LÍQUIDOS (VINAZA) EN LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE ALCOHOL 7	
2.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA VINAZA.....	8
2.4.2. CARGA ORGÁNICA DE LA VINAZA .....	8
2.5. MÉTODOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN DESTILERÍAS.....	9
2.5.1. PROCESOS ANAEROBIOS.....	9
2.5.2. PROCESOS AEROBIOS.....	11
2.6. FILTROS PERCOLADORES .....	13
2.6.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	14
2.6.2. LODOS ACTIVOS EN FILTROS PERCOLADORES .....	16

2.6.3. EFICIENCIA DE LOS FILTROS PERCOLADORES EN EL TRATAMIENTO DE VINAZA .....	17
2.6.4. MEDIOS FILTRANTES DE LOS FILTROS PERCOLADORES .....	18
2.6.5. COMPONENTES DE LOS FILTROS PERCOLADORES .....	20
2.6.6. ARREGLO DE UNIDAD DE TRATAMIENTO BÁSICO .....	22
2.6.7. EFICIENCIA ECONÓMICA DE FILTROS PERCOLADORES .....	23
2.6.8. PARÁMETROS DE DISEÑO DE FILTRO PERCOLADOR LENTO CON MEDIO FILTRANTE ROCOSO.....	23
<b>CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO .....</b>	<b>25</b>
3.1. UBICACIÓN .....	25
3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO.....	26
3.3. FACTOR EN ESTUDIO.....	26
3.4. TRATAMIENTOS .....	26
3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	26
3.7. VARIABLES DE ESTUDIO .....	27
3.7.1. VARIABLE INDEPENDIENTE .....	27
3.7.2. VARIABLE DEPENDIENTE.....	27
3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	27
3.9. PROCEDIMIENTOS.....	28
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>37</b>
4.1. FASE I. IDENTIFICACION DEL AGUA RESIDUAL DE LA DESTILERÍA DE ALCOHOL	37
4.2. FASE II. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL FILTRO PERCOLADOR.....	41
4.3. FASE III. COMPROBACIÓN DE LA TÉCNICA ECONÓMICAMENTE .....	48
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>50</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	50
5.2. RECOMENDACIONES .....	50
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>57</b>

## CONTENIDO DE CUADRO , FIGURAS Y GRAFICOS

Figura 2. 1 Filtro anaerobico de flujo hidraulico descendente .....	11
Figura 2. 2 Ramas de algodón como medio filtrante para filtro percolador. Fuente (Aslam et al., 2017) .....	18
Figura 2. 3. Esquema general de un filtro percolador con flujo descendente. Fuente (Ali et al., 2017).....	21
Figura 2. 4. Esquema general de un filtro percolador con flujo ascendente. ....	22
Figura 2. 5 Esquema de tratamiento de filtro percolador en etapa única .....	23
Figura 3 1 Ubicación de la Planta destiladora, Mocerita-Junín .....	25

Figura 3 2. Esquema del sistema del filtro percolador de acuerdo al experimento .....	32
Figura 3 .3 .Esquema del acondicionamiento y distribución de la pumita en el filtro percolador. .....	33
Cuadro 2. 1 composcion pincipal de la vinaza .....	8
Cuadro 2. 2.Características químicas de la piedra pómez .....	20
Cuadro 2. 3. Criterios para parámetros de diseño de filtro percolador lento con medio filtrante rocoso .....	24
Cuadro 3. 1.Matriz para identificar los impactos y/o efectos ambientales asociados a la vinaza .....	28
Cuadro 3. 2. Parámetros físico químicos a analizar de la vinaza .....	29
Cuadro 3. 3.Parámetros físico químicos a analizar de la vinaza .....	30
Cuadro 3. 4. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce .....	35
Cuadro 3. 5.Resumen de costos para un filtro percolador .....	36
Cuadro 4. 1. Efectos asociados a la producción de vinaza en la planta de alcohol .....	38
Cuadro 4. 2. Condiciones iniciales de los parámetros físico-químicos analizados de lodos residuales.....	39
Cuadro 4. 3. Comparación de los niveles DBO <sub>5</sub> y DQO inicial de la vinaza con los límites máximos establecidos en la normativa ecuatoriana para descarga de efluentes residuales.....	40
Cuadro 4. 4. ANOVA de los tratamientos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Cuadro 4. 5. Comparación de los niveles DBO <sub>5</sub> y DQO de la vinaza tratada con los límites máximos establecidos en la normativa ecuatoriana para descarga de efluentes residuales. ....	43
Cuadro 4. 6. Resumen de la estimación de costos para un filtro percolador .....	48
Cuadro 4. 7. Costos de inversión de uns sistema de filtro percolador en función de los diferentes tratamientos.....	49
Gráficos 4. 1. Producción de vinaza en la destilería de alcohol.....	39
Gráficos 4. 2. Medición del pH del medio filtrante del filtro percolador durante la formación de la biopelícula.....	41
Gráficos 4. 3. Monitoreo de la DQO durante el experimento.....	44
Gráficos 4. 4. Monitoreo de la DBO <sub>5</sub> durante el experimento.....	45
Gráficos 4. 5. Eficiencia de remoción de carga orgánica para el tratamiento 1 .....	42
Gráficos 4. 6. Eficiencia de remoción de carga orgánica para el tratamiento 2.....	42
Gráficos 4. 7. Eficiencia de remoción de carga orgánica para el tratamiento 3.....	43
Gráficos 4. 8. Diagrama de cajas sobre la eficiencia de DQO en los 3 tratamientos.....	46
Gráficos 4. 9. Diagrama de cajas sobre la eficiencia de DBO <sub>5</sub> en los 3 tratamientos.....	46

## RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la carga orgánica para efluentes residuales en la destilería de alcohol con el filtro percolador aeróbico utilizando pumita. Se tomó como ejemplo una planta destiladora creada desde el año 1990. Se realizó tres tratamientos, cada uno incluyó tres repeticiones; lo que tuvo un total equivalente a 9 unidades experimentales. Los resultados se procesaron a través de un análisis de varianza en SPSS versión 21.0. La primera fase del estudio comprendió la caracterización del agua residual, donde se identificó los impactos o efectos asociados al agua residual en la planta. Además, se desarrollaron visitas técnicas para encontrar datos específicos como los niveles de volumen y caracterización del residual producido. En la fase dos, se determinó la eficiencia del filtro percolador. Para esto, el material filtrante fue sometido a un proceso de trituración. Se diseñó y construyó los filtros en función de un DCA simple con una variable y tres tratamientos. Finalmente se valoró la técnica económicamente. Se encontró un volumen de 321L de vinaza, con carga orgánica que sobrepasa los límites permisibles establecidos en el TULSMA; ocasionando efectos en los medios físico, biótico y humano. El aumento del material filtrante tiene un efecto significativo en la eficiencia de remoción de carga orgánica (94% para la DQO y 86% para DBO<sub>5</sub>). Finalmente, se encontró que el prototipo del tratamiento de mayor eficiencia tiene un costo de \$650. El filtro percolador presenta una medida viable para el control de problemas ambientales asociados a la producción de alcohol.

## PALABRAS CLAVE

pumita, filtro percolador, vinaza, destilería.

## **ABSTRACT**

The objective of this research was to evaluate the organic load for effluents in the alcohol distillery with the pumice-proof percolating filter. A distiller plant created since 1990 was taken as an example. Three treatments were carried out, each one including three repetitions; What had a total equivalent to 9 experimental units. The results are processed through an analysis of variance in SPSS 21.0. The first phase of the study included the characterization of wastewater, where the impact on wastewater in the plant was identified. In addition, technical visits will be developed to find specific data such as volume levels and characterization of the residual produced. In phase two, the efficiency of the trickling filter was determined. For this, the filtering material was subjected to a crushing process. The filters were designed and constructed according to a simple DCA with one variable and three treatments. Finally, the technique will be evaluated economically. A volume of 321L of vinasse has been found, with an organic load that exceeds the permissible limits established in the TULSMA; Occurring effects in the physical, biotic and human media. The increase in the filter material has a significant effect on the efficiency of the organic load (94% for COD and 86% for BOD5). Finally, I have found that the prototype of the most efficient treatment has a cost of \$ 650. The percolating filter presents a viable measure for the control of the problems related to the production of alcohol.

### **KEY WORDS:**

pumice, trickling filter, vinasse, distillery.

# CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

## 1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La producción total mundial de alcohol a partir de caña de azúcar es de más de 13 millones de m<sup>3</sup>/año (Kadam y Kanjan, 2012). Esta producción se desarrolla en destilerías basadas mayormente en melaza de esta gramínea y constituye una industria importante en la economía de América del Sur (Tulcan, 2012). En Ecuador, la mayor parte de la producción industrial de etanol se centra en corporaciones de gran representatividad nacional, por ejemplo: Soderal (Sociedad de Destilación de Alcoholes S.A.), Codana y Producargo (Ministerio de Comercio Exterior, 2016). Sin embargo, de las 24 provincias 19 cuentan con plantas artesanales de alcohol generando mensualmente 426730 L de alcohol artesanal (CONSEP, 2015), lo que representa un volumen de residuales sin tratamiento de 6400950 L de vinaza, de acuerdo a Guerrero *et al.* (2016).

Ecuador en la provincia de Manabí, existe la mayor parte de la producción de alcohol (CONSEP, 2015). A pesar de la importancia que tienen dichas plantas artesanales, los efluentes tienen alto contenido de materia orgánica y se estima que por cada litro de alcohol se producen 15 L de vinaza. De acuerdo a Fulazzaky (2013) y (Lindemann, 2017) estos son uno de los efluentes artesanales orgánicos más complejos, problemáticos y con elevados niveles de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) debido a la alta concentración de carga orgánica.

En Manabí se encuentra el cantón Junín más reconocido por esta actividad económica. La comunidad Mocerita cuenta con 15 plantas artesanales de alcohol, a pesar de su pequeña extensión geográfica. Alcívar (2018) esta comunidad reporta que diariamente sus plantas generan aproximadamente 500 L de aguas residuales, mismas que son vertidas directamente a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento previo. Como consecuencia se han generado diversas afectaciones en los factores ambientales (Montilla *et al.*, 2017), lo que deteriora la calidad ambiental de los recursos naturales (agua, suelo, aire, flora y fauna) y calidad de vida de las personas. Estos problemas se evidencian a

través de las alteraciones que han sufrido las propiedades físicas del suelo (color y olor, principalmente), presencia de materiales orgánicos y sólidos en los cuerpos de agua receptores, entre otros.

El alto contenido de carga orgánica en las destilerías artesanales hace necesario el desarrollo e implementación de tecnologías de tratamiento como la elaboración de filtro percoladores para reducir los niveles de contaminación de los vertidos residuales. Para evitar problemas de contaminación asociados a la carga orgánica. De acuerdo a estos antecedentes se plantea la siguiente interrogante:

¿Cuál es la eficiencia de la pumita en el proceso de remoción de carga orgánica?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Con este estudio se pretende encontrar una solución viable para controlar y optimizar la calidad de aguas residuales provenientes de destilerías de alcohol. Esto quiere decir, que los propietarios tengan el conocimiento del daño que le están dando a los recursos naturales (agua, suelo, aire, flora y fauna) ajustándose a las normas nacionales para la adecuada gestión (Anexo I del libro IV TULSMA, 2012)

Esta investigación pretende generar precedentes que puedan potenciar el uso de los recursos naturales (artesanalmente) para dar solución a problemas locales. Asimismo, se pretende gestionar en destilerías de alcohol una medida de control que les ayude al desarrollo comunitario local que en el futuro les permita como una guía para la planificación y gestión integrada de estos recursos.

Finalmente, la investigación se encuentra enmarcada dentro de los Objetivos 3 y 7 del Plan Nacional para el buen vivir que establecen: “Mejorar la calidad de vida de la población” y “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable”, respectivamente (SEMPLADES, 2017).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de un filtro percolador en la remoción de carga orgánica de las aguas residuales producidas en destilerías de alcohol, Junín. El material filtrante a utilizar fue la pumita que es respaldado científicamente por su eficiencia en la remoción de contaminantes (Kemal, 2016). Por estas razones, se sostiene que las aguas residuales en destilerías de alcohol a través del filtro reducirán los niveles de carga orgánica; evitando la contaminación en los cuerpos de agua (subterránea y superficial) y en el suelo. Además, la población local también se beneficiará porque se salvaguardará la integridad de los recursos naturales disponibles.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la remoción de carga orgánica a través del filtro percolador con medio filtrante de pumita para residuales en destilerías de alcohol.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- A. Identificar las aguas residuales en destilerías de alcohol.
- B. Determinar la eficiencia del filtro percolador en la remoción de carga orgánica de destilerías de alcohol.
- C. Comprobar el filtro percolador técnica y económicamente.

### **1.4. HIPÓTESIS**

El filtro percolador como medio filtrante de pumita permitirá una eficiencia significativa en la remoción de carga orgánica en aguas residuales procedentes de destilerías de alcohol.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. OBTENCIÓN DE ALCOHOL DE FORMA INDUSTRIAL

Técnicamente, el alcohol puede producirse a partir de una amplia variedad de materias primas renovables, que pueden clasificarse básicamente en tres grupos principales: (1) los que contienen cantidades considerables de azúcares fácilmente fermentables, (2) almidones y fructosanos y (3) productos celulósicos. La caña de azúcar, proporciona los azúcares simples, como sacarosa, glucosa y fructosa, que pueden fermentarse fácilmente (Amorim *et al.*, 2009). Esto difiere de los procesos de producción de etanol basados en materia prima almidonada o lignocelulósica, donde es necesaria una hidrólisis previa de polisacáridos con un aumento en los costos de producción de etanol (Dien y Bothast, 2009).

Tradicionalmente, la producción de etanol se combinaba con las industrias azucareras (Basso y Rosa, 2010). El azúcar de caña es prensado (algunas plantas usan difusión), resultando en jugo de caña de azúcar y un residuo fibroso sólido. Después de la clarificación, el jugo se concentra por evaporación hasta la cristalización de la sacarosa. Los cristales de sacarosa se recogen por centrifugación, generando una fase viscosa saturada de sacarosa, llamada melaza de caña con 45 a 60% de sacarosa y 5 a 20% de glucosa más fructosa. El proceso opera en lote alimentado, o en modo continuo, ambos utilizan reciclaje de células de levadura. Al de la fermentación, las células de levadura se recogen por centrifugación y se reutilizan en un próximo ciclo de fermentación. Hasta el 90-95% de las células de levadura se reciclan, dando como resultado densidades celulares altas dentro del fermentador (10 a 14%). La reutilización de células reduce la necesidad de una propagación de levadura intensiva, y se desvía menos azúcar para la formación de biomasa. Se estima que la biomasa de levadura aumenta de 5 a 10% (en relación con la biomasa inicial) durante un ciclo de fermentación, que es suficiente para reemplazar las células de levadura pérdidas durante la etapa de centrifugación. Esta alta biomasa de levadura dentro del fermentador es responsable de un tiempo de fermentación muy corto de 6 a 10 h (Cannella y Henning 2014).

Normalmente, la temperatura se mantiene alrededor de 32 a 35 °C, sin embargo, debido al corto tiempo de fermentación, el enfriamiento no siempre es lo suficientemente eficiente para eliminar el calor y la temperatura puede alcanzar hasta 40 ° C, especialmente en la temporada de verano (Lima *et al.*, 2001; Amorim *et al.*, 2004). Generalmente, la fermentación comienza agregando mosto de caña (preparado mezclando jugo de caña y melaza en cualquier proporción), que contiene de 18 a 22% (p/p) azúcares reductores totales (TRS), a una suspensión de células de levadura. Esta suspensión de levadura (con un 30% de células de levadura, en base húmeda) representa del 25 al 30% del volumen total de fermentación, y se realiza en tanques de 300 a 3.000 m<sup>3</sup> (Jonker, 2015.). Cuando cesa la fermentación, las células de levadura se separan por centrifugación. Después de la centrifugación, el producto se destila para la recuperación de etanol. Posteriormente, se produce una corriente líquida "vinaza" que es enviada a los campos de caña para utilizarla como agua de riego y fertilizante (cuando la planta mantiene compromiso ambiental).

## **2.2. PLANTAS DESTILADORAS ARTESANALES DE ALCOHOL**

La producción artesanal de etanol implica la fermentación espontánea causada por microorganismos. Tal proceso de fermentación natural tiene lugar en la producción de alcohol de caña de azúcar en algunos cantones de Manabí. La producción ocurre de mayo a diciembre, durante el período de cultivo de la caña de azúcar. Una de las principales peculiaridades de la producción artesanal de alcohol es la preparación del fermento inicial, que consiste en la propagación de la microbiota fermentativa del jugo de caña de azúcar. El proceso ocurre dentro de la cuba de fermentación y puede durar de 5 a 20 días, hasta que la población de levadura sea suficiente para iniciar el ciclo fermentativo. El ciclo fermentativo resulta en el consumo del azúcar total presente en el jugo de la caña de azúcar y ocurre en un período que puede variar entre 18 a 48 horas. A continuación, se expone el proceso general para la obtención de alcohol a partir del jugo de la caña de azúcar.

## **2.3. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE ALCOHOL ARTESANAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

### **2.3.1. EXTRACCIÓN DE JUGO DE CAÑA**

Se prepara la caña de azúcar utilizando rodillos giratorios y trituradores que reducen la caña a bagazo. Se alimenta a los rodillos con pequeños pedazos adecuados para el proceso de extracción. Se separa el bagazo y el jugo por compresión de la caña de azúcar (Ensinas *et al.*, 2007). El bagazo puede ser usado como combustible en el sistema de cogeneración y el jugo crudo producido se entrega al sistema de tratamiento.

### **2.3.2. FERMENTACIÓN**

Las plantas artesanales de alcohol usan una mezcla de melaza y jugo para la preparación del puré. Una parte del jugo se concentra para alcanzar el contenido óptimo de sólidos necesario para el proceso de fermentación (Modesto *et al.*, 2006). El licor fermentado producido tiene alrededor del 8% de la concentración de etanol por unidad de masa.

### **2.3.3. DESTILACIÓN**

El etanol producido en el proceso de fermentación es aprovechado por destilación. Antes de ingresar a la columna de destilación, el licor fermentado se calienta para alcanzar la temperatura adecuada para el proceso de destilación. El etanol hidratado se obtiene por arrastre y rectificación. Para eliminar el agua restante y obtener el etanol anhidro, se requiere de un proceso de deshidratación. Se produce una gran cantidad de vinaza y debe tratarse como un efluente con alta demanda bioquímica y química de oxígeno.

## **2.4. RESIDUOS LÍQUIDOS (VINAZA) EN LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE ALCOHOL**

El residuo líquido del proceso de producción artesanal de alcohol consiste en la vinaza, caracterizada como un efluente de alto potencial contaminante, que contiene altos niveles de compuestos y nutrientes orgánicos (principalmente

potasio, nitrógeno y fósforo) (Moraes *et. al.*, 2015). Se deriva del proceso de destilación del etanol, y sale de las columnas a una temperatura en el rango de 85-90 °C.

La presencia de melanoidinas y el alto contenido de ácido orgánico proporcionan el color marrón oscuro y un bajo pH, respectivamente. En países como Brasil, las destiladoras de alcohol generan de 10 a 15 L de vinaza por litro de etanol producido (Hofsetz y Silva, 2012).

#### 2.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA VINAZA

Su composición varía a lo largo de la temporada, principalmente debido a la materia prima (por ejemplo, variedades de caña de azúcar, con diferentes índices de maduración, y cultivado en diferentes suelos con diferentes niveles de fertilidad) y por el proceso industrial (por ejemplo, variaciones en el funcionamiento del paso de fermentación y destilación) (Satyawali y Balakrishnan, 2008). Por lo tanto, la vinaza se considera una de las aguas residuales más complejas debido a la variación de su composición. El cuadro 2.1 muestra un ejemplo de los componentes principales de la vinaza ya que no existe mucha información de dichas aguas.

**Cuadro 2. 1** composición pincipal de la vinaza

Parámetro	Valores
pH	4.0-4.9
COD (g L <sup>-1</sup> )	75.8.0-109.7
BOD (g L <sup>-1</sup> )	31.5-4.9
N (g L <sup>-1</sup> )	0.205-0.462
P (g P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> L <sup>-1</sup> )	0.1005
K (g K <sub>2</sub> O L <sup>-1</sup> )	0.040-0.088
SO <sub>2</sub> (g S L <sup>-1</sup> )	0.0146-0.122
Ca (g Ca L <sup>-1</sup> )	0.008-0.012
Mg (g MgO L <sup>-1</sup> )	0.016-0.024
TS (g L <sup>-1</sup> )	0.467-5.805
VS (g L <sup>-1</sup> )	0.454-5.715
Carbón (g C L <sup>-1</sup> )	22.7-33.2
Sustancias reducidas (g L <sup>-1</sup> )	9.166
Fenoles (g L <sup>-1</sup> )	0.4-12.4

Fuente: Moraes *et al.* (2015).

#### 2.4.2. CARGA ORGÁNICA DE LA VINAZA

La vinaza presenta elevados porcentajes de carga orgánica debido a la riqueza de materia orgánica presente en la caña de azúcar. Estudios demuestran que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la vinaza, es hasta 70 veces mayor en

comparación con la DQO admisible (Metcalf y Eddy, 2003) para descargas de aguas residuales a cuerpos de receptores. En este tipo de industrias el límite permisible de DBO es de 250 mg/L según el TULSMA (2015). Por otra parte, en un estudio desarrollado por Beceera (2014) encontró 27767 mg O<sub>2</sub>/L en vinaza cruda en una destilería de alcohol. Se ha encontrado que la relación DBO<sub>5</sub>/DQO de vinaza es de 0,60 que indica la presencia de materia orgánica biodegradable junto a compuestos de baja poco biodegradables.

## **2.5. MÉTODOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN DESTILERÍAS**

### **2.5.1. PROCESOS ANAEROBIOS**

Estos son adecuados, particularmente, para aguas residuales de destilería. La relación DQO/N/P para la digestión anaeróbica podría ser de 800/5/1. Los principales parámetros utilizados para la caracterización de la digestión anaeróbica son: concentraciones de entrada y salida de DQO, DBO, tasa de carga orgánica (kg DQO / m<sup>3</sup> de digestor / d), tiempo de retención hidráulica (día), productividad de gas (m<sup>3</sup> de biogás / m<sup>3</sup> de digestor / d), producción de metano (m<sup>3</sup> de biogás / kg de DQO eliminada) y eficiencia de eliminación de DQO y DBO (Patyal, 2015).

Los rendimientos de eliminación de DQO son generalmente altos para el tratamiento de aguas residuales de destilería. Los valores son generalmente entre 80-98%. La producción de biogás es de alrededor de 500 a 600 litros por kg de DQO eliminado con 60-80% de metano (Nandy *et al.*, 2002). Según Kamali *et al.* (2016) el flujo orgánico debe ajustarse a la capacidad de reacción de los microorganismos. Si el reactor está sobrecargado, se acumularán ácidos grasos volátiles, el pH disminuirá y fallará la tecnología (reactor o filtro anaeróbico).

Entre una serie de alternativas de diferentes tratamientos anaerobios, generalmente aplicables a efluentes en destilerías de alcohol, se consideran los más adecuados se encuentran:

#### **2.5.1.1. REACTOR DE LECHO SUSPENDIDO DE FLUJO ASCENDENTE**

El reactor de flujo ascendente es el digestor más común que se ha utilizado para el tratamiento anaeróbico de varios tipos de aguas residuales industriales (Syutsubo *et al.*, 1997). Este tipo de método ha dado resultados de hasta 75% de remoción de DQO en los procesos relacionados con caña de azúcar. Sin embargo, se requiere dilución antes del tratamiento debido a la presencia de algunas sustancias inhibidoras como el azufre compuestos, iones de potasio y calcio e hidrógeno.

#### **2.5.1.2. REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO**

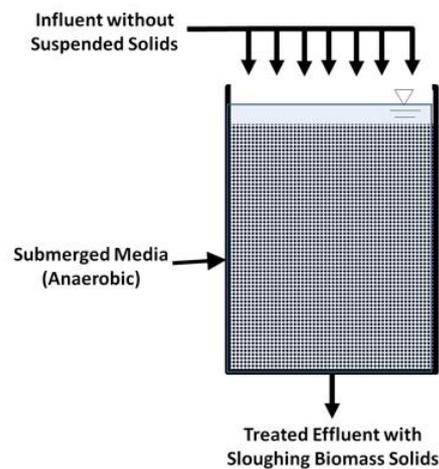
Los reactores de lecho fluidizado es una tecnología donde los portadores de la biopelícula se fluidizan mediante recirculación líquida. Los portadores son partículas o material inerte, contienen un medio apropiado como arena, grava o materiales plásticos para la unión y el crecimiento bacteriano. Los reactores pueden ser operados en los modos de flujo ascendente o descendente. La fluidización se realiza aplicando un fluido de altas velocidades, normalmente mediante el reciclaje de efluentes. Estudios en tratamiento de efluentes de destilería en un lecho fluidizado han dado como resultado una reducción del 75-95% en el contenido de carbono (García *et al.*, 1998).

#### **2.5.1.3. CONTACTO ANAERÓBICO**

El proceso de contacto anaeróbico es un reactor totalmente mezclado con separación y recirculación de lodo hacia el reactor metanogénico. La realización de la desgasificación de los lodos mejora la consistencia del lodo para la separación.

#### **2.5.1.4. FILTRO ANAERÓBICO**

Reactor con un medio filtrante inerte con una superficie específica alta para el crecimiento de la biomasa (hoy mayoritariamente material plástico), principalmente con separación externa y recirculación de lodo (Habouzit y Torrijos, 1998). El filtro anaeróbico se puede ejecutar en un patrón de flujo hidráulico hacia abajo (Figura 2.1) o hacia arriba.



**Figura 2. 1** Filtro anaerobico de flujo hidraulico descendente  
**Fuente:** Oakley y von Sperling, 2017

La materia orgánica soluble se elimina al entrar en contacto con la biopelícula anaeróbica; las bajas concentraciones de sólidos suspendidos también pueden eliminarse reteniéndose dentro del medio y posteriormente biodegradando. En ambos diseños (flujo ascendente y descendente), dado que no hay entrada de oxígeno, las condiciones anaerobias prevalecen en el líquido y la biopelícula (Chernicharo, 2007). Pero es necesario, periódicamente limpiar o renovar el material filtrante debido a la acumulación de residuos dentro del filtro.

#### **2.5.1.5. REACTOR DE SECUENCIA DE SECUENCIA ANAERÓBICA**

Es una técnica muy prometedora. El digester contiene el lodo anaeróbico. El contiene el agua residual producida y la digestión anaeróbica comienza con la mezcla. Cuando se termina la producción de biogás, la agitación se detiene y el lodo anaeróbico se deposita en el digester. La bomba flotante elimina la misma cantidad de agua residual añadida. El proceso se puede reiniciar (Ruiz *et al.*, 2002).

#### **2.5.2. PROCESOS AEROBIOS**

Éstos generalmente se utilizan como tratamiento secundario para aguas residuales producidas en destilerías de alcohol debido a que después de un tratamiento anaerobio, aún suelen presentar alta carga orgánica. Entre estos procesos se encuentran los siguientes tratamientos para aguas residuales de destilerías de alcohol:

### **2.5.2.1. USO EN LA ACUICULTURA**

Se ha utilizado efluentes post biometano para la piscicultura cerca de la ciudad de Chennai en el sur de la India. El efluente biodigerido, que es un medio de crecimiento rico, es dirigido a estanques de bioconversión después de lo cual se extiende en aproximadamente 6 hectáreas de estanques de peces. La DBO se reduce a casi cero y la iniciativa produce alrededor de 50 toneladas por hectárea por año de peces (Vorion Chemicals y Distilleries Ltd., 1999).

### **2.5.2.2. HUMEDALES ARTIFICIALES**

Este tratamiento se ha utilizado después del tratamiento anaeróbico. En un estudio, el efluente tratado anaeróbico tenía una DBO de aproximadamente 2500 mg / l y una DQO de casi 14,000 mg / l. Una cámara de pretratamiento llena de grava fue utilizada para capturar los sólidos en suspensión. Todas las celdas se llenaron de grava hasta diferentes alturas. El tiempo de retención global fue de 14.4 días y el tratamiento resultó en reducciones del 64% de DQO, 85% de DBO, 42% de sólidos totales y 79% de fósforo (Billore *et al.*, 2001).

### **2.5.2.3. TRATAMIENTO POR HONGOS**

Los hongos de putrefacción que producen enzimas ligninolíticas son capaces de degradar los xenobióticos y organopolutantes. *Phanerochaete chrysosporium* y *Trametes versicolor* han sido los más estudiado. Gonzalez *et al.* (2000). Encontró que el *P. chrysosporium* JAG 40 produjo una decoloración del 80% de sintéticos diluidos de melanoidina (unidad de absorbancia de 3.5 a 475 nm).

### **2.5.2.4. TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO**

La melaza de caña de azúcar después del tratamiento biológico por ambos métodos anaeróbico y aeróbico todavía puede tener una DBO de 250-500 mg (Mall y Kumar, 1997). Además, aunque el tratamiento biológico resulta en una DQO significativamente reducida, el efluente conserva el color oscuro. Las melanoidinas que imparten color son casi inafectadas por el tratamiento biológico convencional tal como la fermentación de metano y el proceso de lodo activado. En este contexto, varios tratamientos físico-químicos han sido explorados.

## 2.6. FILTROS PERCOLADORES

Son un tipo único de tratamiento biológico de película fija. En este tipo de filtros, los microorganismos utilizados para tratar las aguas residuales se unen, o se fijan, a un medio sólido a medida que entran en contacto con las aguas residuales. Estos microorganismos forman un crecimiento en el medio conocido como película zoogélica. También se conocen como filtros biológicos para enfatizar que el proceso de filtración no es el esfuerzo mecánico de sólidos, sino la eliminación de sustancias orgánicas mediante el uso de acción bacteriana (Lesikar y Persyn, 2011).

De acuerdo a una revisión desarrollada por The Pennsylvania State Association of Township Supervisors (2016) las aguas residuales aplicadas a un filtro percolador deben someterse a un tratamiento primario antes de ser filtradas por esta tecnología, de lo contrario los sólidos bloquearán el filtro. Deben pasar a través de una pantalla de barra mecánica y/o clarificadores primarios donde se eliminan la mayoría de los sólidos sedimentables y flotantes. El efluente del filtro percolador siempre pasa a través de un clarificador secundario o filtro de arena para permitir la captura de sólidos generados como resultado del tratamiento del agua residual. El lodo (sólidos) de un clarificador final debe ser bombeado nuevamente al clarificador primario o a un espesador de lodo para un tratamiento posterior. En los filtros percoladores no se produce filtración física; los contaminantes se eliminan mediante procesos biológicos en un entorno aeróbico (Eding *et al.*, 2006).

A medida que las aguas residuales gotean sobre las superficies de los medios sólidos, las sustancias orgánicas quedan atrapadas en la capa de baba bacteriana (Dermou *et al.*, 2005). Las bacterias absorben las sustancias orgánicas de la misma manera que en el proceso del lodo activado, mientras que el aire se difunde a la capa de lodo desde los espacios de aire en el lecho del filtro de goteo. De acuerdo a Kornaros y Lyberatos (2006) el crecimiento y la reproducción de las bacterias tienen lugar y dan como resultado un aumento del espesor de la capa de limo, particularmente en la parte superior del filtro

biológico. Periódicamente, el limo bacteriano se desprende de las superficies de los medios filtrantes y se va con el agua residual tratada.

El requerimiento de energía para operar un filtro percolador es mínimo en comparación con otros métodos, debido a que el suministro de oxígeno a la bacteria es proporcionado por la difusión natural del aire. Sin embargo, el requerimiento de área de un filtro percolador es mayor que el de otros procesos para lograr la misma calidad de agua residual tratada (Lekang y Kleppe, 2000).

### **2.6.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

El proceso de tratamiento del filtro percolador ocurre a través de la degradación biológica del material orgánico por bacterias y microorganismos contenidos en la película zooglear en el medio filtrante. Estos microorganismos reducen principalmente la demanda de oxígeno bioquímico carbonoso (cBOD) de las aguas residuales; sin embargo, también pueden utilizarse para reducir el nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) a través del proceso de "nitrificación".

#### **2.6.1.1. PROCESO BIOLÓGICO DEL FILTRO PERCOLADOR**

La eficacia del tratamiento de un filtro percolador es el resultado de las acciones de metabolización de bacterias y microorganismos presentes en la película zooglear que se desarrolla en los medios filtrantes. Controlar las poblaciones biológicas en un filtro percolador no es lo mismo o tan crítico como controlar las poblaciones biológicas en un sistema de lodo activado. La mayor parte del proceso de estabilización de las aguas residuales en un filtro de goteo involucra la película zooglear que consiste en formas de plantas tales como algas. A continuación, se detalla una breve descripción del proceso biológico para el tratamiento de aguas residuales (James, 1964).

#### **2.6.1.2. MICROORGANISMOS EN FILTROS PERCOLADORES**

La importancia de las bacterias en la descomposición biológica en las aguas residuales ha sido aceptada durante muchos años. Para los filtros se reconoció desde 1914 cuando se estableció que el medio filtrante se cubrió rápidamente con un crecimiento viscoso de *Zoogloea ramigera*. Concluyó que La zoogloea es quizás el organismo más característico e importante de esta zona. La

importancia de las bacterias en los filtros se ha establecido durante este tiempo. Desafortunadamente, ha habido menos acuerdo con la naturaleza de la flora bacteriana. Los primeros trabajadores en este campo se inclinaron a considerar la bacteria aerobia formadora de esporas como el grupo más importante. Por ejemplo, Russell y Bartow (1916), en el curso de sus estudios sobre el tratamiento de aguas residuales, aislaron 13 variedades de bacterias.

#### **2.6.1.2.1. BACTERIAS AERÓBICAS**

- ✓ Requiere oxígeno disuelto para la respiración.
- ✓ Descomponen y estabilizan las sustancias orgánicas en materia soluble que se convierten en energía.
- ✓ Los productos de desecho incluyen dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoníaco y fosfatos.

#### **2.6.1.2.2. BACTERIA ANAERÓBICA**

- ✓ Puede utilizar nitrato ( $\text{NO}_3$ ) o sulfato ( $\text{SO}_4$ ) como fuentes de oxígeno alternativas.
- ✓ Cuando no hay oxígeno disuelto disponible, se usa nitrato ( $\text{NO}_3$ ) como fuente de oxígeno.
  - La eliminación de  $\text{NO}_3$ , también conocida como desnitrificación, causa un ligero aumento en la alcalinidad.
  - El  $\text{NO}_3$  se convierte en gas  $\text{N}_2$ .
  - Teóricamente, se crean 3,57 lb de alcalinidad durante la reducción de  $\text{NO}_3$ .
  - Cuando el oxígeno disuelto y  $\text{NO}_3$  no están disponibles, se usa sulfato ( $\text{SO}_4$ ) como fuente de oxígeno.
    - El nitrógeno orgánico se usa como fuente de alimento, lo que provoca un aumento significativo en la alcalinidad.
    - Esto conduce a la generación de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

La microbiología de un filtro percolador incluye organismos complejos unicelulares y multicelulares. Estos organismos se alimentan de materia orgánica y bacterias. Existen los siguientes tipos diferentes de microorganismos:

### **2.6.1.2.3. PROTOZOOS**

Típicamente son animales unicelulares con sistemas digestivos complejos que consumen materia orgánica sólida y bacterias como fuentes de energía. Son el siguiente nivel en la cadena alimenticia después de la bacteria. En el proceso de filtros percoladores actúan dos tipos de protozoos; estos incluyen a los flagelados con especies como: *Dinomonas Flagellate* y *Peranema Flagellate*; y a los ciliados con especies como: *Ciliate Lionotus* y *Cilate Vorticella*. Éste último se ancla en las partículas suspendidas del filtro percolador y utilizan cilios para filtrar desechos orgánicos.

### **2.6.1.2.4. ROTÍFEROS**

Son organismos multicelulares. Utilizan cilios alrededor de sus cabezas para filtrar residuos orgánicos y bacterias que se metabolizan como alimento. Su presencia es una indicación de un proceso de tratamiento biológico muy eficiente. El *Philodina Rotifer* es un microorganismo característico de esta categoría.

### **2.6.1.2.5. NEMÁTODOS**

Son una forma de vida más avanzada presente en los sistemas de medios de crecimiento adjuntos. Dependiendo de la especie, el organismo puede ser visible a simple vista. Los nematodos se alimentan de los microorganismos más pequeños y simples que se encuentran en la capa de baba, como las bacterias y los protozoos.

## **2.6.2. LODOS ACTIVOS EN FILTROS PERCOLADORES**

De acuerdo a Kornaros y Lyberatos (2006) un filtro percolador debe ser inoculado principalmente con lodo activado tomado de una cuenca aeróbica de planta de tratamiento de aguas residuales. Posteriormente, el pH del agua residual tratada fisicoquímicamente se debe ajustar a valores entre 7 y 8 usando soluciones de

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaOH. En caso de que el agua residual tratada sea deficiente en N y P, deben ser añadidas las cantidades apropiadas a las aguas residuales para soportar el crecimiento de microorganismos y asegurar que tanto el crecimiento microbiano como la eliminación de carga orgánica estarían limitados solo por el contenido de carbono de aguas residuales. El N y P se pueden suministrar en forma de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>/K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (para aumentar la capacidad del tampón de aguas residuales) y las sales (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, en cantidades variables dependiendo de la DQO de las aguas residuales de alimentación.

### **2.6.3. EFICIENCIA DE LOS FILTROS PERCOLADORES EN EL TRATAMIENTO DE VINAZA**

Los filtros percoladores proporcionan un tratamiento primario de sedimentación cuando la vinaza se encuentra libre de sólidos suspendidos cuyas partículas sean visibles. Sin embargo, son considerados como un tratamiento secundario (Becerra, 2014) porque, en la mayoría de casos, la vinaza debe ser tratada previamente debido a la presencia de sólidos suspendidos que se han mezclado posterior a la destilación, tales como: restos de caña de azúcar, coloides, entre otros (Fonseca, 2016). Los filtros percoladores son la alternativa adecuada para eliminar los componentes contaminantes de mayor tamaño en las aguas residuales de vinaza. Eliminan materia orgánica disuelta y sólidos finamente fraccionados, mediante microorganismos adheridos al medio filtrante. Eliminan los sólidos disueltos y no sedimentables como resultado del crecimiento de bacterias y otros microorganismos en los medios (Ali *et al.*, 2017). El crecimiento biológico de estos organismos usa el material orgánico disuelto en presencia de oxígeno como fuente de alimento. Los sólidos orgánicos finamente divididos también se adsorben en las paredes celulares de los microorganismos.

Los filtros percoladores generalmente se han utilizado para clarificar la vinaza (Becerra, 2013). En este tipo de tratamiento han sido muy eficientes, luego de que la vinaza en su estado natural presenta un tono altamente oscuro, cuando son sometidas a tratamiento por filtros percoladores, éstas cambian su coloración a un tono muy claro. La utilización de filtros percoladores pueden ayudar a mejorar muchos parámetros en la vinaza, sobre todo los físicos: olor, color, sólidos disueltos y sólidos suspendidos, entre otros. Pero generalmente,

siempre requieren de la asociación de varias tecnologías para que el resultado sea más eficiente (Valenzuela *et al.*, 2010).

#### 2.6.4. MEDIOS FILTRANTES DE LOS FILTROS PERCOLADORES

Los medios sólidos pueden ser piedras, grava de carbón residual o medios de plástico especialmente fabricados. Estas últimas pueden ser láminas de plástico corrugado o cilindros de plástico huecos, con el objetivo principal de proporcionar una gran superficie para que las bacterias se adhieran, mientras que al mismo tiempo se permite la libre circulación de aire (Chernicharo y Nascimento, 2001). Normalmente, los medios sólidos se colocan en un tanque sobre un soporte con aberturas para permitir que el aire se mueva hacia arriba por convección natural y para que las aguas residuales tratadas se recojan en el drenaje inferior.

La estructura de retención de los filtros percoladores es generalmente una pared circular construida de bloques reforzados de concreto o arcilla vitrificada. Estas paredes pueden construirse con aberturas o pueden ser sólidas. Varios materiales se han usado como medios filtrantes. Piedra dura (dolomita, piedra caliza dura, y cuarcita, entre otros.), varias cerámicas, bloques o listones de secoya, ramas de árboles (ver figura 2.1) (Aslam *et al.*, 2017) y, más recientemente, plástico sintético.



**Figura 2. 2** Ramas de algodón como medio filtrante para filtro percolador. Fuente (Aslam *et al.*, 2017)

Históricamente, la piedra ha sido utilizada como medio filtrante. Los nuevos tipos de medios sintéticos de plástico proporcionan algunas ventajas sobre piedra. Estas ventajas incluyen una mayor área de superficie por unidad de volumen y un mayor porcentaje de espacios vacíos.

#### **2.6.4.1. PIEDRA PÓMEZ COMO MEDIO FILTRANTE**

La piedra pómez es una roca ígnea de color claro y extremadamente porosa que se forma durante las explosivas erupciones volcánicas. Se utiliza como agregado en concreto liviano, como agregado de paisajismo y como abrasivo en una variedad de productos industriales y de consumo. Es un material altamente poroso como para flotar en el agua, pero con un alto porcentaje de absorción de agua, lo que le permite hundirse cuando sus poros haya se saturado (Galdames y Díaz 2015).

El medio ideal deberá tener las siguientes propiedades: área de superficie específica alta, espacio vacío alto, peso ligero, inercia biológica, resistencia química, durabilidad mecánica y bajo costo.

##### **2.6.4.1.1. CARÁCTERÍSTICAS Físico químicas de la piedra pómez**

La piedra pómez es lo suficientemente ligeras y lo suficientemente fuertes como para ser utilizadas como áridos livianos. Su ligereza se debe al escape de gas de la lava fundida. La piedra pómez tiene una textura bastante uniforme; es uno de los tipos más antiguos de agregados livianos que también se han utilizado en estructuras romanas. Es un agregado liviano de baja gravedad específica.

De acuerdo a Bhavana y Rambabu (2017) la composición química de esta roca está representada principalmente por el Dióxido de silicio (71,91 %) y Óxido de aluminio en un contenido más bajo (12,66 %). En el cuadro 2.2 se detallan los componentes químicos que caracterizan a la piedra pómez.

**Cuadro 2. 2.** Características químicas de la piedra pómez

Contenido	Porcentaje ( % )
Dióxido de silicio	71,91
Óxido de aluminio	12,66
Óxido férrico	1,13
Óxido de Calcio	1,46
Óxido de magnesio	0,32
Óxido de sodio	3,45
óxido de potasio	4,30
Trióxido de azufre	0,03
Pérdida de calcificación	4,53
Contenido indefinible	0,21

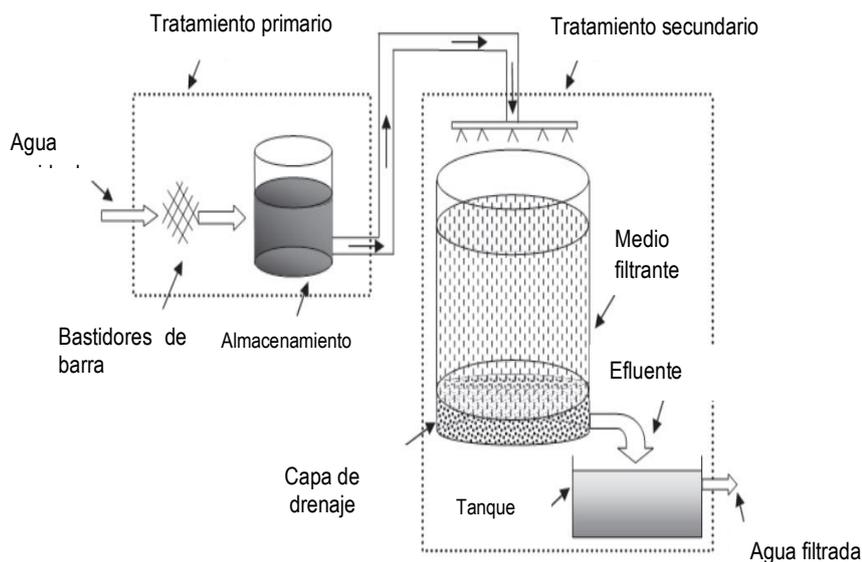
**Fuente:** Bhavana y Rambabu (2017)

Las publicaciones científicas evidencian el uso de la pumita en procesos de adsorción (Çifçi y Meriç, 2016). Se ha utilizado en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de cadmio, colorantes y color. La piedra pómez ha sido utilizada con éxito como un adsorbente para la eliminación de metales pesados como As, Ar, Cu, Co, Ce, Zn, Se, Cd, Cr y Ni.

#### 2.6.5. COMPONENTES DE LOS FILTROS PERCOLADORES

Los principales componentes de los filtros percoladores típicos son un distribuidor rotativo, sistema de drenaje bajo y el medio filtrante. El afluente de agua residual se bombea verticalmente de manera ascendente a un distribuidor rotativo para repartir el flujo de manera unifórmeme sobre la superficie del medio filtrante (Ali *et al.*, 2017). En el caso de la vinaza, se debe utilizar un tanque de almacenamiento inicial que permita la reducción de la temperatura del líquido a temperatura ambiente y asegure un flujo constante de residuo hacia la boquilla que se acciona como consecuencia de la energía cinética del flujo circulante.

La Figura 2.3 muestra un esquema de un filtro percolador de flujo descendente, a medida que el agua fluye hacia abajo, la materia orgánica soluble es eliminada por microorganismos aeróbicos heterótrofos que están contenidos en una biopelícula unida al medio. La biopelícula crece gradualmente a medida que entra en contacto con las aguas residuales que pasan.

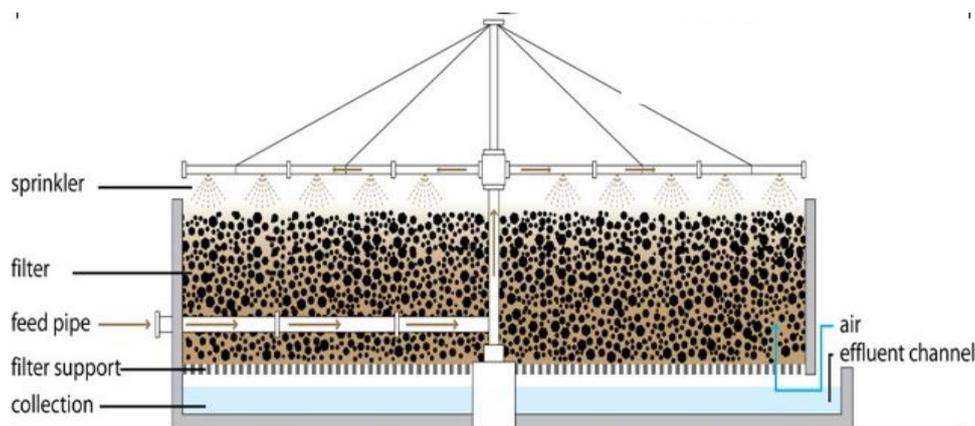


**Figura 2. 3.** Esquema general de un filtro percolador con flujo descendente. Fuente (Ali *et al.*, 2017).

El brazo giratorio es impulsado por la reacción del agua residual que sale de las boquillas del distribuidor (Metcalf y Eddy, 2003). Los sumideros de las camas transportan el efluente y permiten que entre aire circulación. El sistema de distribución rocía agua residual en forma de goteo en la superficie del medio. Las boquillas están dispuestas de forma desigual de modo que un mayor flujo por unidad de longitud se obtiene cerca de la periferia del filtro en comparación con el centro. También es mucho más común encontrar filtros percoladores de flujo ascendente. De acuerdo a las propuestas de diseño de Logan *et al.*, 2012, en este caso el proceso es similar al explicado previamente con la diferencia de que el proceso de filtrado demanda más tiempo (figura 2.4).

Un filtro percolador funciona debido a la porosidad del material filtrante que permite la proliferación de una capa de biomasa que degrada la materia orgánica retenida en la superficie del medio filtrante. Por esta razón, el uso de materiales porosos, ya sean naturales o artificiales contribuye al crecimiento de microorganismos que consumen la materia orgánica atrapada en los poros del medio.

La aireación se produce por la convección natural del aire a través de los puertos de ventilación conectados al sistema de drenaje inferior en la base del filtro. El medio filtrante no está saturado, es decir, una vez que el líquido se escurre hacia abajo, los espacios porosos están ocupados por aire, lo que garantiza las condiciones aeróbicas. Como resultado, los filtros percoladores requieren sedimentación secundaria para eliminar la biopelícula desprendida en el proceso de filtración que se mide como sólidos en suspensión



**Figura 2. 4.** Esquema general de un filtro percolador con flujo ascendente.

Generalmente los filtros percoladores pueden tratar diariamente entre 25 y 100 galones de vinaza por pie cuadrado. Por esto, en los diseños prevalece el tratamiento de 50 galones por pie cuadrado por día (Lesikar y Enciso).

#### 2.6.6. ARREGLO DE UNIDAD DE TRATAMIENTO BÁSICO

Los filtros percoladores generalmente están precedidos por clarificadores primarios y seguidos por clarificadores finales. Sin embargo, hay varias variaciones diferentes de este tema (PSATS, 2016). Se pueden operar dos o más filtros al unísono y se pueden incorporar clarificadores intermedios entre los filtros. Los arreglos de la unidad de tratamiento se pueden clasificar en las siguientes dos categorías:

- ✓ Etapa única
- ✓ Dos etapas

En la figura 2.5 se muestra un ejemplo del tratamiento de filtro percolador en etapa; implica un clarificador primario seguido de un filtro percolador y finalmente seguido de un clarificador final.



**Figura 2. 5** Esquema de tratamiento de filtro percolador en etapa única

### 2.6.7. EFICIENCIA ECONÓMICA DE FILTROS PERCOLADORES

Se puede calcular a través de una ecuación utilizada por Nandy *et al.* (2001) quienes realizaron la sumatoria de todos los costos implicados en la construcción, mano de obra, operación y materiales necesarios utilizados en el proceso de fabricación del filtro.

$$C_E = CC + MO + OyM + M \quad [2.1]$$

- ✓ **Donde:**
- ✓  $C_E$  = Costo económico del filtro
- ✓  $CC$  = Costo de construcción (USD)
- ✓  $MO$  = Mano de obra (USD)
- ✓  $OyM$  = Operación y mantenimiento (USD)
- ✓  $M$  = Materiales (USD)

### 2.6.8. PARÁMETROS DE DISEÑO DE FILTRO PERCOLADOR LENTO CON MEDIO FILTRANTE ROCOSO

Para el diseño de filtros percoladores, generalmente se utilizan los criterios establecidos por la Environmental Protection Agency (2001). Es importante considerar que estos criterios son aplicados para tratar volúmenes significativos de agua residuales, a escala industrial (Cuadro 2.3).

**Cuadro 2. 3.** Criterios para parámetros de diseño de filtro percolador lento con medio filtrante rocoso

Parámetros	Criterios
Diámetro	6 - 65 m
Profundidad	1,5 - 2,5 m
Velocidad de la boquilla de los brazos del distribuidor	<1.2 m/s
Altura del brazo distribuidor sobre los medios	0,15 - 0,3 m
Ventilación / flujo de aire	<b>Natural:</b> 0,03 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *min <b>Calado forzado:</b> 0.3 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *min
Tasa de carga orgánica	0,08 – 0,1 kg DBO/m <sup>3</sup> *d
Carga hidráulica	1–4 m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> *d
Eliminación de DBO	80-90%
Clarificación	40 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d

**Fuente:** EPA (2000)

## CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del estudio se tomó como ejemplo una planta destiladora de alcohol que fue creada desde el año 1990. Esta planta ha desarrollado el proceso de producción de alcohol de manera constante, desde su instalación hasta la actualidad. La planta produce dos tipos de aguas residuales: 1) generadas en proceso de destilación (vinaza) y 2) generadas a través de limpieza de equipos y materiales. Para este caso, se consideró los residuales de vinaza debido a que las investigaciones relacionadas con este residual comprueban que éstas presentan un alto contenido de carga orgánica perjudicial para la calidad ambiental.

### 3.1. UBICACIÓN

La planta destiladora está situada geográficamente en la Comunidad Mocorita; al Noreste de la ciudad de Junín, a 3 Km del centro de la misma, en las coordenadas  $0^{\circ}55'07.8''S$ ; y  $80^{\circ}10'46.0''W$   $0^{\circ}55'07.8''S$   $80^{\circ}10'46.0''W$ .

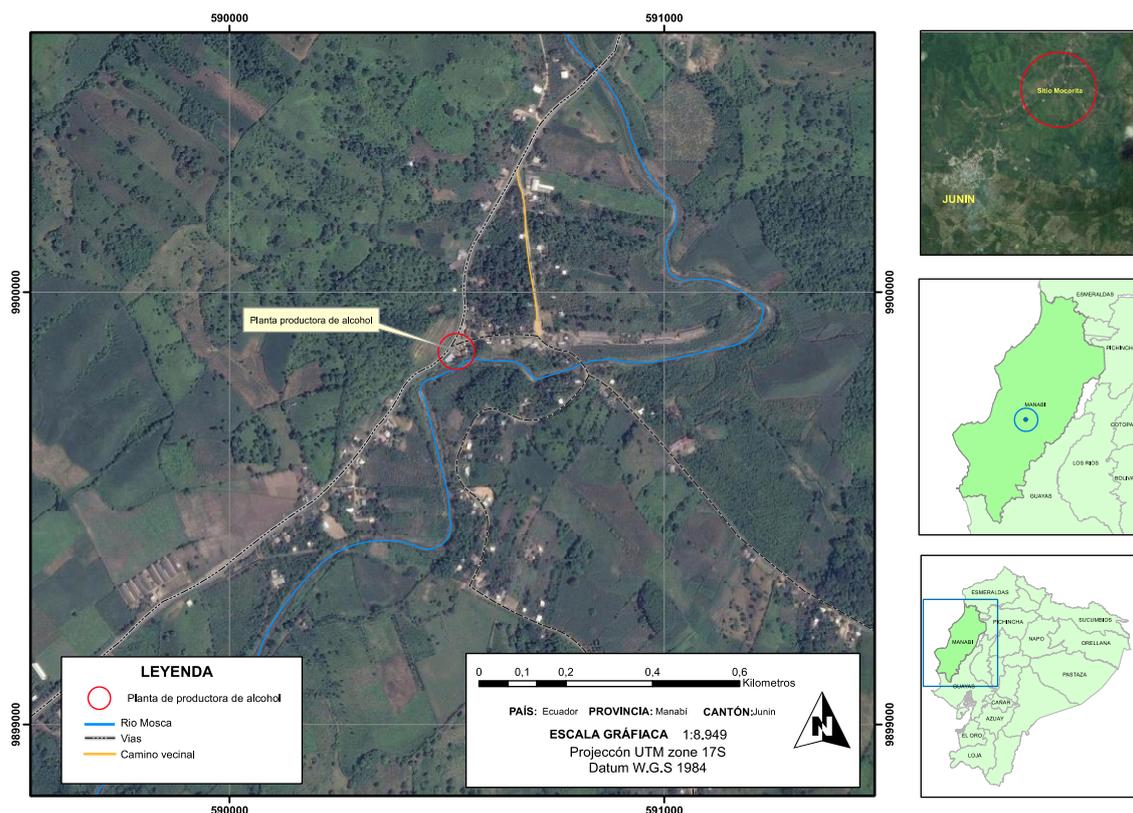


Figura 3 1 Ubicación de la Planta destiladora, Mocorita-Junín

### 3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO

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

### 3.3. FACTOR EN ESTUDIO

Espesor de la capa del material filtrante (pumita) en el filtro percolador.

Nivel	Espesor de capa de pumita (cm)
T <sub>1</sub>	20 cm
T <sub>2</sub>	30 cm
T <sub>3</sub>	40 cm

### 3.4. TRATAMIENTOS

Se realizó tres tratamientos, cada uno con tres repeticiones; lo que dio un total equivalente a 9 unidades experimentales.

### 3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un diseño completamente al azar, con una variable y tres tratamientos. Se procesó los resultados utilizando un análisis de varianza en el software SPSS 21.0. Para el análisis de los resultados se usó una guía de diseño experimental desarrollada por Gutiérrez (2012). Se consideró un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días para monitorear las concentraciones de las variables de independientes (DQO y DBO<sub>5</sub>).

Tratamiento	Espesor de capa de pumita (cm)	TRH	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
T <sub>1</sub>	20 cm	5			
		10			
		15			
		20			
		25			
		30			
T <sub>2</sub>	30 cm	5			
		10			
		15			
		20			
		25			
		30			
T <sub>3</sub>	40 cm	5			
		10			
		15			
		20			
		25			
		30			

### 3.7. VARIABLES DE ESTUDIO

#### 3.7.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Espesor de la capa de pumita en el filtro percolador.

#### 3.7.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Carga orgánica para efluentes residuales.

### 3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

El procesamiento de datos se realizó a través de análisis estadísticos, tales como: diagramas de cajas, entre otros a través del paquete ggplot2 del software R-project versión 3.3.3 (2017).

A través del software Statistical Package for the Social Sciences (SPSS, 2017) versión 20 se realizó la prueba estadística Análisis de Varianza de un factor

(ANOVA) para la comprobación de la hipótesis planteada.

### 3.9. PROCEDIMIENTOS

#### 3.9.1. FASE I. IDENTIFICAR EL AGUA RESIDUAL DE LA DESTILERÍA DE ALCOHOL

##### Actividad 1. Identificar los impactos o efectos asociados al agua residual en la planta

Esta actividad se desarrolló a través de la aplicación de la metodología propuesta por AES Gener S.A (2017) que coincide con los criterios de muchos autores para la identificación de problemas asociados a un aspecto ambiental (para este caso la producción de vinaza). A través de observaciones, se identificó los impactos y/o efectos asociados a la vinaza en el área de estudio. Además, se siguió la metodología de Christofolletti et. Al.(2013) quienes propone que se realice una revisión bibliográfica sobre los efectos de la vinaza en los recursos naturales y posteriormente, contrastar en campo a través de indicadores de afectación, tales como: color, aromas, vectores , entre otros. En el cuadro 3.1. se presenta la matriz a utilizar para categorizar los efectos controlados.

**Cuadro 3. 1.**Matriz para identificar los impactos y/o efectos ambientales asociados a la vinaza

Medio	Ambiente de los componentes	Impactos y/o efectos identificados
Físico	Calidad del aire	
	Calidad del suelo	
	Calidad del agua	
Biótico	Flora y vegetación	
	Fauna	
Humano	Ambiente social	
	Paisaje	

**Fuente:** GENER S.A (2017)

## Actividad 2. Medir volúmenes de generación de agua residual en la planta destiladora

La medición de los volúmenes se desarrolló a través de un monitoreo diario de los caudales generados en la planta de alcohol. Se debe desarrollar en un tiempo mínimo de dos semanas para procurar que los datos sean más confiables (Wu, 2013).

## Actividad 3. Determinar las características físicas y químicas del agua residual

Se realizó la toma de muestras de residuales de la destilería (vinaza) a través de la captación directa del efluente residual en la salida de la torre de destilería. Se recaudó un total de 20L en tres tiempos distintos (8H00, 12H00 y 16H00). Posteriormente, las muestras se homogenizaron para realizar una sola mezcla. De esta mezcla se tomó un volumen de 500 ml como lo recomienda Alzate (2015) para evaluar las características físicas y químicas a través de análisis de laboratorio, en función de los criterios establecidos por el Sistema Nacional de Laboratorios. En el cuadro 3.5 se presentan los parámetros físicos químicos de la vinaza que fueron analizados para conocer las características iniciales.

**Cuadro 3. 2.** Parámetros físico químicos a analizar de la vinaza

Parámetros	Unidad	Equipo o técnica utilizada
Temperatura de ebullición	°C	Termómetro
pH	- - -	pH-metro <i>Adwa AD11 waterproof</i>
Conductividad	µS/cm	Equipo de uso múltiple PCE-PHD 1
Turbidez	NTU	Equipo de uso múltiple PCE-PHD 1
Sólidos disueltos	mg/L	Gravimetría
Sólidos suspendidos	mg/L	Filtración-Gravimetría
Sólidos totales	mg/L	Gravimetría
Curva de titulación de la vinaza	Kg NaOH/L vin	Pipeta de titulación (Solución NaOH)

**Fuente:** Solorzano, (2019)

#### **Actividad 4. Determinar la concentración de Carga Orgánica del residual previo al tratamiento**

En esta actividad, al igual que la anterior se realizó en el laboratorio, se analizaron parámetros físicos Y químicos: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la DQO (Olmedo, 2005). Se comparó los resultados obtenidos en el análisis del residual pre-tratamiento con los límites máximo permisible de descarga a cuerpos de agua dulce (Cuadro 3.6) establecidos en el Libro VI, Anexo 1, tabla 9 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente TULSMA (2015).

**Cuadro 3. 3.**Parámetros físico químicos a analizar de la vinaza

Parámetros	Unidad	Límite máximo permisible
DBO <sup>5</sup>	mg/L	100
DQO	mg/L	200

**Fuente:** Libro VI, Anexo 1, tabla 9 del TULSMA (2015)

### **3.9.2. FASE II. DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL FILTRO PERCOLADOR**

#### **Actividad 5. Acondicionar el material filtrante en función de las características selecciones**

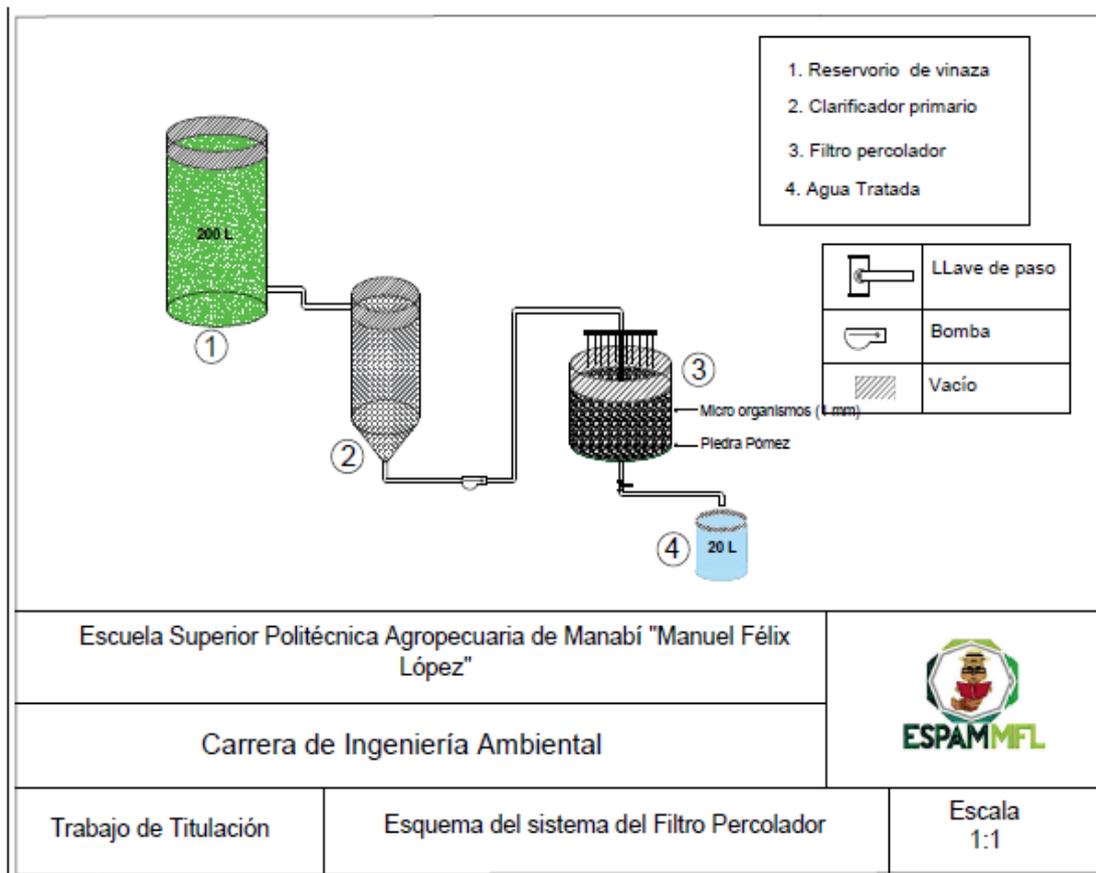
El material filtrante se obtuvo de una mina de la ciudad de Cotopaxi. Debido a que el tamaño original era muy grande en comparación con el tamaño para realizar pruebas de filtración a escala piloto, se optó por someterlo a un proceso de triturado a través de un martillo para que el agua residual (vinaza) se pudiera distribuir continuamente. Se consideró una porosidad entre 35-50% en función de las recomendaciones de Daigger y Boltz (2011) para tipos de rocas (para este caso, la pumita) como el material filtrante previo a su aplicación en el filtro:

El material filtrante triturado fue pasado a través de un tamiz de 1,25 cm (0,5") como lo recomienda Velástegui (2018); obteniendo un tamaño de la partícula de 1cm.

### **Actividad 6. Construir filtros percoladores a escala piloto de acuerdo al experimento**

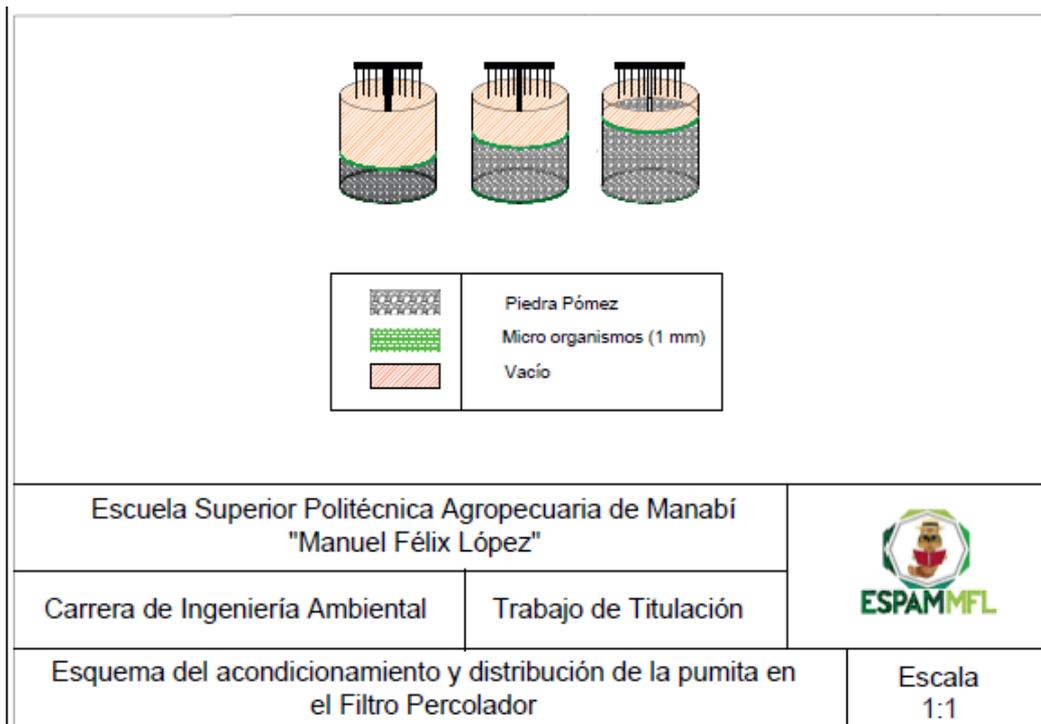
El sistema de filtro percolador consistió en función de las características de tratamiento de una etapa (figura 2.5), siguiendo las recomendaciones de Bailón *et al.* (2009). Se realizó una relación entre el volumen del filtro percolador y los niveles de pumita que constituyó cada tratamiento. El diagrama esquemático del sistema de filtro percolador a escala piloto se muestra en la figura 3.1. Se recolectó el agua residual procedente de la destilería de alcohol y se transportó hasta el lugar donde se desarrolló el experimento. La vinaza se colocó en un tanque reservorio de 200L, con un diámetro interno de 60cm y una altura de 90cm, cuya función era agitar las muestras y alimentar al sistema (Lemji y Eckstädt, 2013). También se instaló un clarificador primario de forma cónica como proponen Díez *et al.* (2019) para que las partículas de mayor peso se asienten en el fondo y el agua residual llegue al filtro percolador semitratada. La altura del clarificador fue de 60cm y un diámetro interno de 40cm.

Posteriormente, estaba ubicado el filtro percolador que consistió en un recipiente de 50L con un diámetro interior de 70cm y una altura total de 50cm. En la parte superior del filtro, se instaló un distribuidor de flujo fijo para facilitar una distribución uniforme de la vinaza pre tratada suministrada a la superficie libre del filtro por el clarificador primario. Finalmente, se colocó una llave de paso que iba a permitir que el agua tratada se almacenara en un recipiente de 20L. El filtro percolador tuvo una breve fase de aclimatación antes de estar listo para la operación completa. El filtro al ser abierto, tuvo suficiente circulación de aire de forma natural y la única demanda de energía fue para bombear el agua alimentada del clarificador primario al filtro percolador a través de una bomba Pedrollo (pk60hr24) de ½ HP. Se utilizó una bomba para cada tres filtros (por cada tratamiento).



**Figura 3 2.** Esquema del sistema del filtro percolador de acuerdo al experimento **Autor.** Solorzano, (2019)

Finalmente, se seleccionó una cantidad significativa de pumita para ubicarla dentro del filtro percolador en función del espesor requerido para cada filtro. De acuerdo a la figura 4.2, se observa que el espesor de la capa filtrante de pumita varió en 20 cm, 30 cm y 40 cm. En el análisis de datos se usó la guía metodológica de Gutiérrez (2012) para diseños experimentales.



**Figura 3 .3** .Esquema del acondicionamiento y distribución de la pumita en el filtro percolador.

**Autor:** Solórzano, 2019

### **Actividad 7. Adaptación de microorganismos**

A cada unidad experimental se le aplicó una solución de vinaza al 10% en 1L de agua purificada (Siles *et al.*, 2011). El material filtrante fue saturado previamente con agua potable para que la solución de la vinaza se concentrara en la superficie y de esta forma se desarrolle la biopelícula. La razón para sembrar el filtro de goteo con este efluente se debió al hecho de que hay una alta probabilidad de obtener poblaciones microbianas que son nativas de las mismas (Leta, 2004). Posteriormente, se sembró poblaciones de microorganismos eficientes DECON (agregado orgánico de bacterias nitrificantes y ácido lácticas, estreptococos, Levaduras *Sacharomyces* y *Streptomyces*, enriquecido con solución de aminoácidos y enzimas). Se estabilizó la solución de vinaza a pH casi neutro, a través de la adición de NaOH en función de la curva de titulación determinada en la actividad 3. El objetivo del equilibrio del pH fue permitir que los microorganismos DECON pudiesen sobrevivir y adaptarse al medio del filtro ya que su pH es de 6,8 y de esta forma se desarrolló la biopelícula del filtro.

Diariamente, durante 15 días se realizó la estabilización y medición del pH. Este último se realizó a través de un potenciómetro *Adwa AD11 waterproof* que se sumergió a la muestra y a través de sus electrodos registró los niveles de acidez.

### **Actividad 8. Monitorear el experimento para control de las variables**

Se trató 100L de vinaza en un período de 30 días a través del sistema de filtro percolador. La llave de control se abrió cada 5 días para la toma de muestra a analizar. La muestra se recogió en un recipiente de 20L para realizar las pruebas de control del experimento. Esta fue la actividad más delicada porque se controló que el residual ingrese con un pre-tratamiento para evitar saturaciones prematuras en el material filtrante. También se controló las válvulas (abriendo o cerrando, según sea el caso). Asimismo, se verificó que no se presenten variaciones en la presión del filtro de entrada y salida en los diferentes días de experimentación. La otra variable controlada fue los volúmenes de flujo de salida y las concentraciones de salida de fangos (sólidos sedimentados) en el clarificador primario, durante los períodos de prueba de filtración para cada unidad experimental (Kuslu y Sahin, 2013).

### **Actividad 9. Determinar la concentración de carga orgánica del agua filtrada**

Se desarrolló el mismo procedimiento de la actividad 4 para conocer los niveles de concentración de carga orgánica post-tratamiento. La DQO y DBO<sub>5</sub> fueron monitoreadas los días 5, 10, 15, 20, 25 y 30 como lo sugieren Travieso *et al.* (2006).

### **Actividad 10. Comparar los datos de la concentración de carga orgánica del agua filtrada con la normativa ambiental aplicable a descargas de efluentes residuales**

Los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio post-tratamiento de los parámetros de DBO<sub>5</sub> y DQO se comparó con los límites de descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce (Cuadro 3.8) establecidos en el Libro VI, Anexo 1, tabla 9 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del

Ambiente (2015). La finalidad de la comparación es identificar si los tratamientos aplicados permitirán estabilizar los niveles de carga orgánica, en función de los criterios definidos en la normativa ambiental.

**Cuadro 3. 4.** Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO <sub>5</sub>	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	250

**Fuente:** Libro VI, Anexo 1, tabla 9 del TULSMA (2015)

### **Actividad 11. Análisis de la eficiencia de la pumita como medio filtrante para la remoción de carga orgánica en aguas residuales**

La eficiencia de remoción de la carga orgánica de la vinaza se calculó a través de ecuación 3.2 utilizada por Rasool *et al.* (2017) en un estudio similar.

$$E_r = \frac{CO_i - CO_f}{CO_i} * 100 \quad [3.2]$$

**Donde:**

$E_r$  = Remoción de carga orgánica (%)

$CO_i$  = Carga orgánica inicial (mg/L)

$CO_f$  = Carga orgánica final (mg/L).

### **Actividad 12. Realizar una prueba estadística para comprobar la eficiencia del filtro percolador en la remoción de carga orgánica**

Se realizó un análisis de varianza entre los datos registrados de carga orgánica previamente al ingreso del filtro percolador y post-tratamiento. Si el valor obtenido es igual o inferior a 0,05 existirá diferencia significativa y la hipótesis

planteada será comprobada y aceptada. Se utilizó el software software R-project versión 3.3.3 (2017).

### 3.9.3. FASE III. COMPROBAR LA TÉCNICA ECONÓMICAMENTE

#### Actividad 13. Realizar una estimación económica sobre el filtro

Para la estimación del costo del filtro percolador, se consideró una matriz resumida sobre el costo/producción de la tecnología (Cuadro 3.9) empleada por la Agencia de Protección Ambiental (2000). Estos costos incluyen construcción, mano de obra, operación y mantenimiento, y materiales necesarios. Como cada sistema de filtro percolador es exclusivo de su sitio, el costo total será sitio específico.

**Cuadro 3. 5.**Resumen de costos para un filtro percolador

Flujo de Aguas Residuales (L)	Costo de construcción (USD)	Mano de obra (USD)	Operación y mantenimiento (USD)	Materiales (USD)

Fuente: EPA (2000)

#### Actividad 14. Comprobar la eficiencia económica del filtro

La eficiencia económica del filtro percolador de la carga orgánica de la vinaza se calculó a través de ecuación 2.1 utilizada por Nandy *et al.* (2001). Posteriormente, se realizó una comparación entre el costo económico más bajo de los filtros con un costo real de un tratamiento convencional para vinaza. Finalmente se realizó un cuadro comparativo donde se presenten los beneficios económicos y ambientales relacionados a las dos tecnologías.

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. FASE I. IDENTIFICACION DEL AGUA RESIDUAL DE LA DESTILERÍA DE ALCOHOL**

#### **Actividad 1. Identificar los efectos asociados a la producción de vinaza en la planta de alcohol**

Los efluentes residuales en las destilerías de alcohol no son manejados adecuadamente. Se encontró que no cumplen con estándares técnicos para la instalación de sistemas de saneamiento o de disposición final de los efluentes líquidos producidos. Los propietarios de la destilería han improvisado una fosa directa en el suelo donde llegan finalmente los residuales. No obstante, esto ha desencadenado serios problemas en el sitio de estudio y en la localidad en general, sobre todo a los componentes: aire, suelo, agua, biodiversidad, sociedad y paisaje (ver cuadro 4.1).

Los problemas ocasionados a la sociedad se manifiestan a través de las inconformidades de pobladores locales quienes dan testimonio de molestias que han desarrollado como consecuencia del inadecuado manejo de residuos líquidos de la planta. Los recursos naturales como el suelo y agua son evidentes que han sufrido afectaciones, sobre todo al verificar que no existen barreras protectoras ante el contacto del residual y el recurso. Esto es común en la mayoría de plantas artesanales y ante los efectos ocasionados Gianchini y Ferraz (2009) han enfatizado una perspectiva ambiental y, en algunos casos, debatido la aplicación de la vinaza debido a sus efectos en el suelo y las aguas subterráneas. La identificación de efectos se realizó bajo observaciones directas del área de estudio y conversatorios con los habitantes.

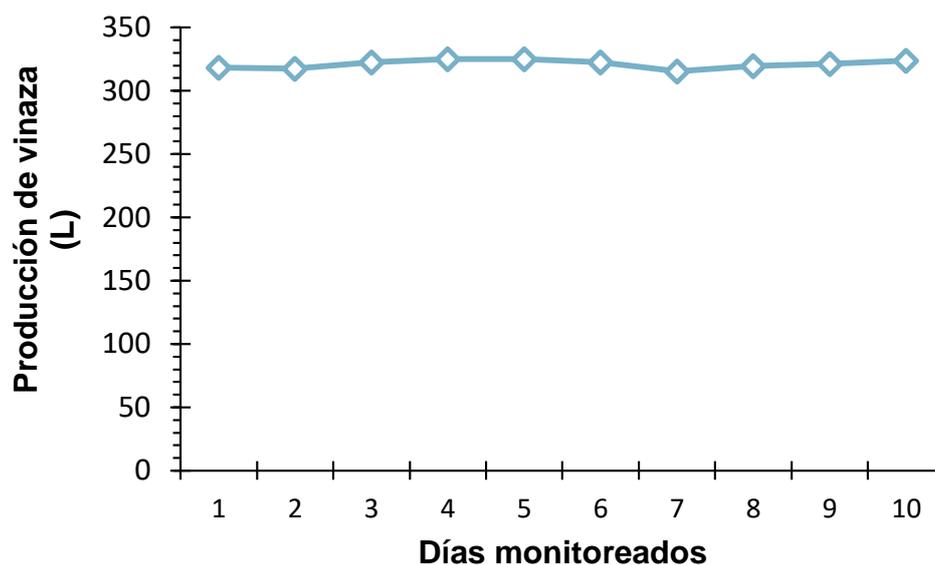
**Cuadro 4. 1.** Efectos asociados a la producción de vinaza en la planta de alcohol

Medio	Ambiente de los componentes	Efectos identificados
Físico	Calidad del aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Presencia de olores no agradables al sentido humano.</li> <li>▪ Emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.</li> </ul>
	Calidad del suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alteración de las propiedades físico-químicas de la cobertura vegetal.</li> <li>▪ Infertilidad de los suelos donde están ubicados las destiladoras.</li> <li>▪ Erosión hídrica.</li> </ul>
	Calidad del agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aumento de la carga orgánica en los cuerpos de agua locales.</li> <li>▪ Eutrofización de los cuerpos de agua locales.</li> </ul>
Biótico	Flora y vegetación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pérdida de densidad de especies vegetales.</li> </ul>
	Fauna	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Proliferación de vectores o plagas.</li> <li>▪ Pérdida de especies nativas.</li> <li>▪ Destrucción de hábitats de especies locales.</li> <li>▪ Alteración de la cadena trófica.</li> </ul>
Humano	Ambiente social	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Malestares físicos en los habitantes locales.</li> <li>▪ Bajo nivel de educación ambiental.</li> <li>▪ Conciencia ambiental limitada.</li> <li>▪ Bajas relaciones entre actores comunitarios.</li> </ul>
	Paisaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pérdida de la calidad visual.</li> <li>▪ Desequilibrio de los ecosistemas.</li> </ul>

**Autor:** Solórzano, (2019)

## **Actividad 2. Medir volúmenes de generación de agua residual en la planta destiladora**

Los volúmenes de producción de vinaza en las destilerías de alcohol de Junín se generan en horarios 8H00, 13H00 y 16H00, y son constantes durante toda la semana. En promedio se obtiene un volumen de producción de 321,087L, diariamente. En el gráfico 4.1 se aprecia como durante los días monitoreados la producción de vinaza no superó los 326L. Esto se asocia a que los productores trabajan con producciones fijas de alcohol debido a la capacidad de los equipos.



**Gráficos 4. 1.** Producción de vinaza en la destilería de alcohol.  
 Autor: Solórzano, (2019)

### Actividad 3. Determinar las características físicas y químicas del agua residual

La caracterización de los residuales fue un factor crítico para establecer una estrategia de gestión efectiva o proceso de tratamiento correspondiente. Por lo tanto, para obtener un conjunto representativo de información sobre los residuales de destilerías de alcohol, se recolectaron y caracterizaron tres muestras (Anexo 5). El cuadro 4.2 presenta las condiciones iniciales de los residuales de la planta de alcohol.

**Cuadro 4. 2.** Condiciones iniciales de los parámetros físico-químicos analizados de lodos residuales

Parámetro	Unidad de medida	Resultado
pH	---	3,25
Sólidos totales	g/L	22,8
Salinidad	mg/L o ppm	
Turbidez	---	21
Color	---	316
Temperatura	°C	25,4
Conductividad	ms	8,57
Curva de titulación de la vinaza	NaOH/mL vin	12,7
DQO	mg/dm <sup>3</sup>	23200
DBO <sub>5</sub>	mg/dm <sup>3</sup>	22204

Autor: Solórzano, (2019)

El pH de la vinaza presentó una tendencia ácida (3,25); lo que se relaciona con la mayoría de estudios (Leal *et al.*, 2003; Lugo, 2017; Gozález *et al.*, 2018) que comprueban que el residual de las destilerías es altamente ácido. Ante esto, se optó por estabilizar el pH a través de la aplicación de NaOH hasta encontrar una curva de titulación óptima, para este caso de 12,5mL NaOH; lo que permitió alcanzar un pH de 7,5. Esto concuerda con Alzate (2015) quien encontró que, a través de la aplicación de 12,7mL NaOH el residual de vinaza se estabiliza a un pH de 7,5.

#### **Actividad 4. Determinar la concentración de carga orgánica del residual previo al tratamiento**

En el cuadro 4.3 se muestra una comparación entre los niveles de concentración de DBO<sub>5</sub> y DQO de la muestra inicial de vinaza con los límites máximos permisibles para descargas de residuales a cuerpos de agua dulce, contemplados por el TULSMA (2015).

**Cuadro 4. 3.** Comparación de los niveles DBO<sub>5</sub> y DQO inicial de la vinaza con los límites máximos establecidos en la normativa ecuatoriana para descarga de efluentes residuales.

<b>Parámetro</b>	<b>Lím. Perm.</b>	<b>Inicial</b>
DBO <sub>5</sub>	100,00	22204
DQO	250,00	23200

**Autor:** Solórzano, (2019)

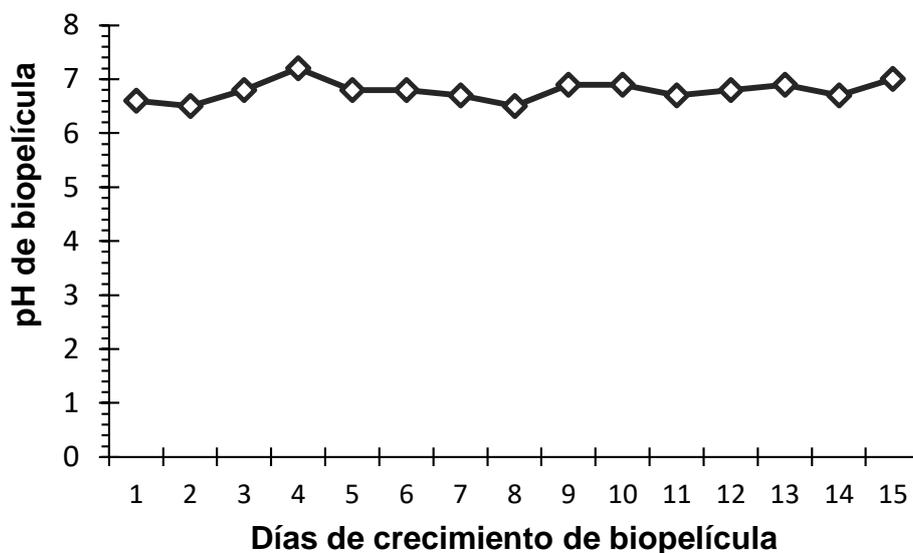
La concentración de DBO<sub>5</sub> de la vinaza se presenta en un nivel de 22204 mgO<sub>2</sub>/L y la DQO en niveles de 23200 mgO<sub>2</sub>/L; ambos parámetros sobrepasan significativamente los límites máximos permisibles. No obstante, esto es característico en este tipo de residuales, incluso autores como Ospina (2014) han encontrado que la de DQO de la vinaza puede presentarse en cantidades de hasta 46294 mgO<sub>2</sub>/L (es decir casi el doble en comparación con este hallazgo). Por otra parte, Curbelo y Acosta (2014) reportan valores de DBO<sub>5</sub> de 18.000 mgO<sub>2</sub>/L, concentración menor en relación a este estudio.

## 4.2. FASE II. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL FILTRO PERCOLADOR

### PERCOLADOR

#### Actividad 7. Adaptación de microorganismos

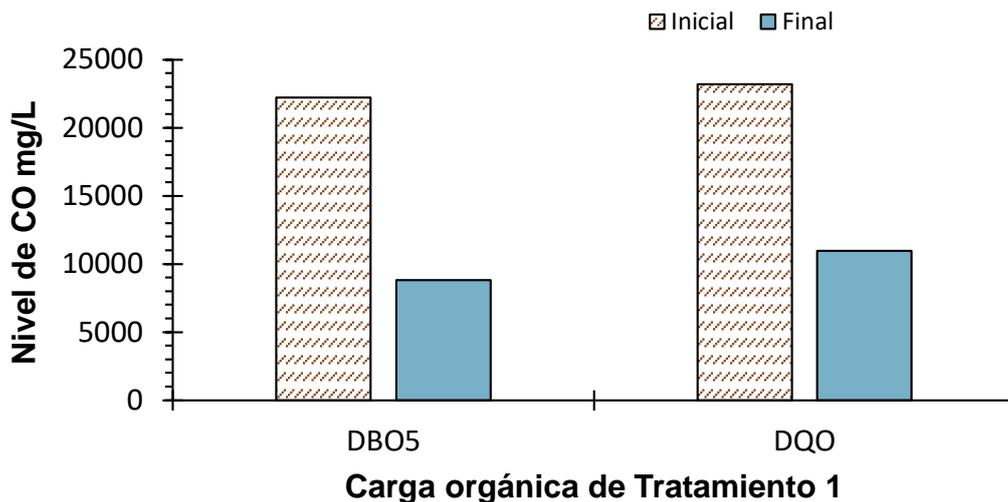
Los microorganismos desarrollaron la biopelícula en un período de 15 días en una altura de <1mm, coincidiendo con lo descrito por Revsbech *et al.* (1989) quienes reportan que en un período de 13 días se puede alcanzar el espesor óptimo de biopelícula para el funcionamiento del filtro percolador. En el gráfico 4.2 se detallan los niveles de pH estabilizados durante el período de crecimiento de la biopelícula.



**Gráficos 4.2.** Medición del pH del medio filtrante del filtro percolador durante la formación de la biopelícula.

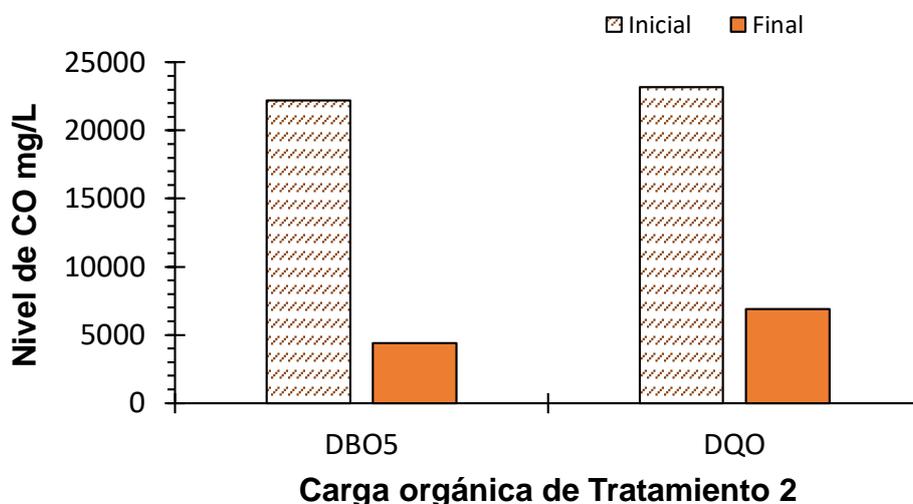
#### Actividad 9. Determinar la concentración de carga orgánica del agua filtrada

En el gráfico 4.3 se muestra la eficiencia de concentración de carga orgánica en para el tratamiento 1 que redujo 13388,00 mgO<sub>2</sub>/L para la DBO<sub>5</sub> y 12246,03 para la DQO durante los días del experimento (ver Anexo 1 y 2). Por su parte, Jing *et al.* (2009) afirman que los niveles bajos del espesor de pumita no permiten una eficiencia significativa para la remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> porque existe menor área para que los microorganismos queden retenidos en el material filtrante.



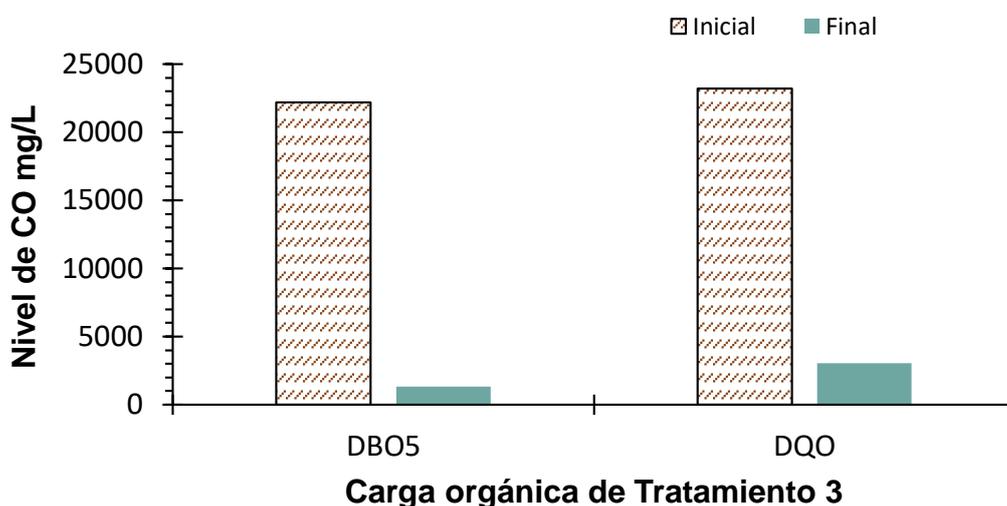
**Gráficos 4.3.** Eficiencia de remoción de carga orgánica para el tratamiento 1

De acuerdo al gráfico 4.4, la concentración de carga orgánica en la vinaza para el tratamiento 2 se redujo a un nivel de hasta 4408 mgO<sub>2</sub>/L para la DBO<sub>5</sub> y 6883,24 mgO<sub>2</sub>/L para la DQO durante los días del experimento (Anexo 1 y 2). Generalmente, el nivel de material filtrante implica directamente la eficiencia de los filtros percoladores, a mayor espesor mayor eficiencia (Kitis *et al.*, 2006). Estos autores encontraron que, de tres niveles de espesor, el intermedio alcanza una eficiencia intermedia en comparación con los niveles del espesor mayor y menor.



**Gráficos 4.4.** Eficiencia de remoción de carga orgánica para el tratamiento 2.

La cantidad removida de carga orgánica en la vinaza para el tratamiento 3 fue 20889,33 de  $\text{mgO}_2/\text{L}$  para la  $\text{DBO}_5$ ; quedando en un nivel de 1314,67  $\text{mgO}_2/\text{L}$ . Por otra parte, la DQO se redujo en un nivel de hasta 20140,78  $\text{mgO}_2/\text{L}$ ; obteniendo un valor final de 3059,22  $\text{mgO}_2/\text{L}$  durante los días del experimento (gráfico 4.5). Esto coincide con Kuslu y Sahin (2012) quienes encontraron una remoción de hasta 90,5% para la DQO y 93% para la  $\text{DBO}_5$ .



Gráficos 4.5. Eficiencia de remoción de carga orgánica para el tratamiento 3.

#### Actividad 10. Comparar los datos de la concentración de carga orgánica del agua filtrada con la normativa ambiental aplicable a descargas de efluentes residuales

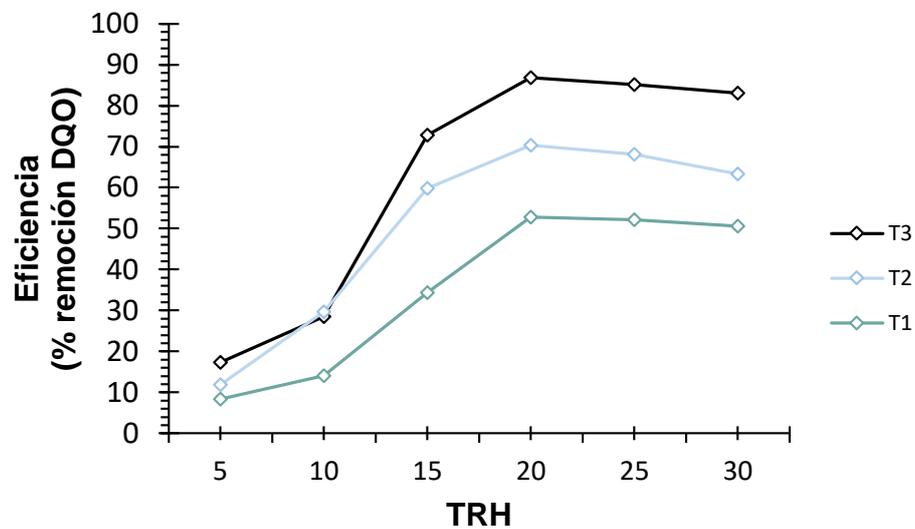
En el cuadro 4.5 se puede apreciar cómo los niveles de los residuales de la destiladora de alcohol sobrepasan los límites máximos permisibles de descarga para los parámetros de  $\text{DBO}_5$  y DQO a cuerpos de agua dulce. Sin embargo, haciendo una comparación con los niveles iniciales de  $\text{DBO}_5$  y DQO, los tres tratamientos han mejorado significativamente las condiciones de estos parámetros.

Cuadro 4. 4. Comparación de los niveles  $\text{DBO}_5$  y DQO de la vinaza tratada con los límites máximos establecidos en la normativa ecuatoriana para descarga de efluentes residuales.

Carga orgánica	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	LMP
$\text{DBO}_5$	8816,00	4408,00	1314,67	100
DQO	10953,97	6883,24	3059,22	250

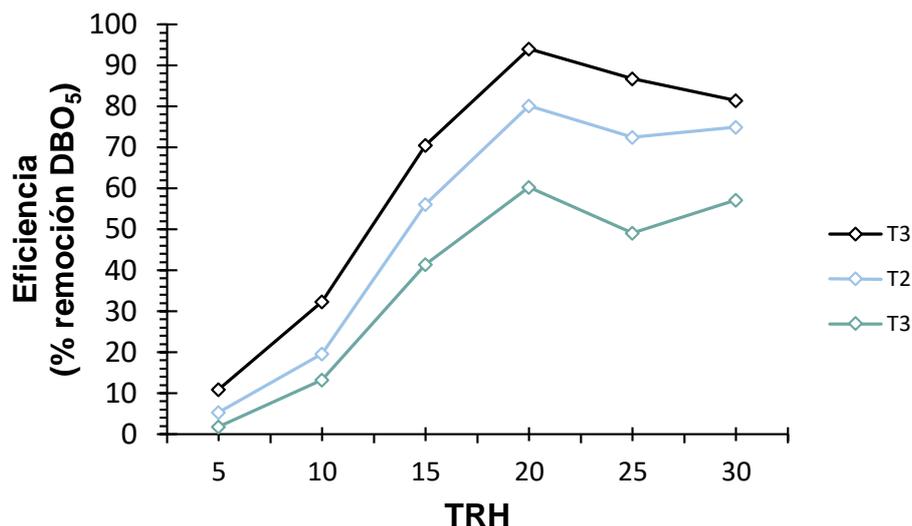
### Actividad 11. Análisis de la eficiencia de la pumita como medio filtrante para la remoción de carga orgánica en aguas residuales

La DQO y  $\text{DBO}_5$  presentan una mayor eficiencia en el tratamiento durante el día 20. El gráfico 4.6 y 4.7 muestran el efecto del TRH en la eficiencia de la remoción de la carga orgánica en los diferentes tratamientos.



Gráficos 4.6. Monitoreo de la DQO durante el experimento.

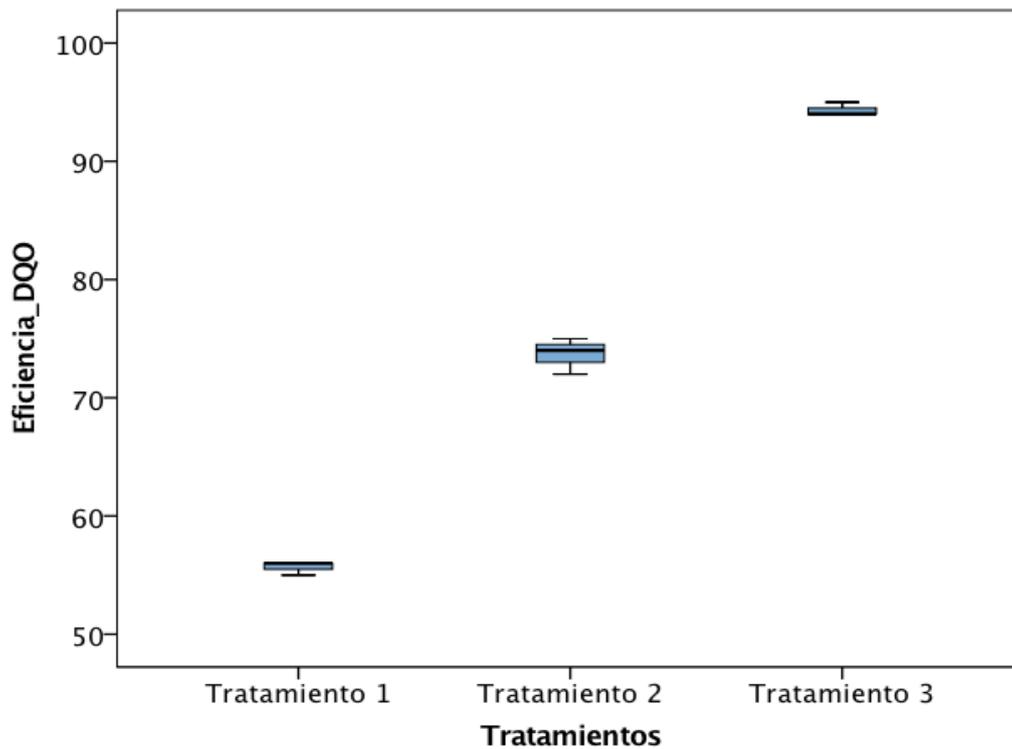
Un aumento del TRH determinó un aumento de la eliminación de carga orgánica para todas las unidades experimentales utilizadas. Sin embargo, a partir del día 20 el afluente provocó una disminución de la eficiencia de remoción (Anexo 3 y 4).



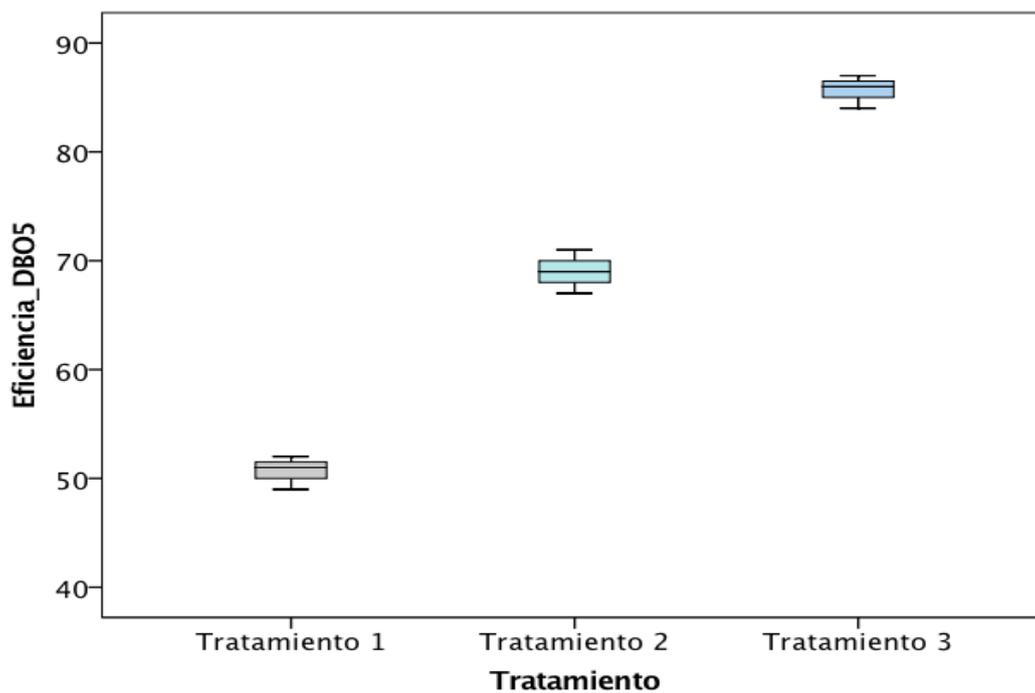
Gráficos 4.7. Monitoreo de la DBO<sub>5</sub> durante el experimento.

En comparación con la DQO, la DBO<sub>5</sub> registró mayor eficiencia en el tratamiento. Pero, de la misma forma, los tres tratamientos coincidieron en que la mayor eficiencia se presentó en el día 20. Sin embargo, esto contrasta con lo encontrado por Tekerlekopoulou *et al.* (2017) quienes reportan que con un filtro percolador con cultivos mixtos, con una base cónica, de 1,5 m de altura y 1,8 m de diámetro interno, se alcanza una eficiencia aproximada del 70%, después de 3 días de funcionamiento. Por otra parte, los mismos autores señalan que en el día 5 la eliminación de DQO aproximadamente tiene una eficiencia del 55%, en temperaturas de 16-20°C. Sin embargo, los días posteriores la eficiencia de remoción de DQO empieza a reducirse progresivamente hasta los 10 días. Por ello, Żyłka *et al.* (2018) recomiendan que se realice operaciones de recirculación.

En el gráfico 4.8 se muestran la eficiencia de la remoción de DQO en tres tratamientos aplicados. El tratamiento 3 presenta mayor eficiencia en todas las repeticiones en comparación con el tratamiento 2 y 1 (Anexo 3 y 4).



**Gráficos 4.3.** Diagrama de cajas sobre la eficiencia de DQO en los 3 tratamientos.



**Gráficos 4.4.** Diagrama de cajas sobre la eficiencia de DBO<sub>5</sub> en los 3 tratamientos.

El manejo del exceso de lodo no es un problema grave porque la cantidad de lodo producido es pequeña y la densa naturaleza del lodo hace que sea fácil de asentar dentro del clarificador primario. Por lo tanto, el proceso de tratamiento biológico propuesto parece ser un método prometedor de tratamiento de vinaza

para hacer frente a las aguas residuales de la producción de alcohol con respecto a la eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub>, Esto coincide con lo que nos dice (Eding *et al.*, 2006).

### Actividad 12. Realizar una prueba estadística para comprobar la eficiencia del filtro percolador en la remoción de carga orgánica

La importancia de cada coeficiente se determinó a través de un ANOVA donde el valor p, considerando un 95% de confianza, en la que los valores de p bajos ( $p < 0,05$ ) indican una importancia alta del coeficiente correspondiente. En el ANOVA expuesto se muestra el efecto estadísticamente relevante de cada factor de respuesta; siendo un modo práctico para ver los resultados (cuadro 4.4). Ambas variables (DBO<sub>5</sub> y DQO) presentan un valor de  $p < 0,05$ ; lo que considera estadísticamente significativos. Por lo tanto, se cumple la hipótesis del estudio porque se encontró significancia entre los niveles de remoción de la DQO y DBO<sub>5</sub>.

**Cuadro 4. 5.** ANOVA de los tratamientos

<b>Tests of Between-Subjects Effects</b>						
Source	Variable dependiente	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Modelo corregido	Eficiencia_DQO	2246,22 <sup>a</sup>	2	1123,11	1123,11	0,000
	Eficiencia_DBO <sub>5</sub>	1838,89 <sup>b</sup>	2	919,44	318,27	0,000
Intercepción	Eficiencia_DQO	50026,78	1	50026,78	50026,78	0,000
	Eficiencia_DBO <sub>5</sub>	42161,78	1	42161,78	14594,46	0,000
Tratamiento	Eficiencia_DQO	2246,22	2	1123,11	1123,11	0,000
	Eficiencia_DBO <sub>5</sub>	1838,89	2	919,44	318,27	0,000
Error	Eficiencia_DQO	6,00	6	1,00		
	Eficiencia_DBO <sub>5</sub>	17,33	6	2,89		
Total	Eficiencia_DQO	52279,00	9			
	Eficiencia_DBO <sub>5</sub>	44018,00	9			
Total corregido	Eficiencia_DQO	2252,22	8			
	Eficiencia_DBO <sub>5</sub>	1856,22	8			
a. R Squared = ,997 (Adjusted R Squared = ,996)						
b. R Squared = ,991 (Adjusted R Squared = ,988)						

### 4.3. FASE III. COMPROBACIÓN DE LA TÉCNICA ECONÓMICAMENTE

#### Actividad 13. Realizar una estimación económica sobre el filtro

En el cuadro 4.6. se presenta la estimación económica para tratar 500L de vinaza en una destiladora artesanal de alcohol es necesario una inversión de \$250 para la adquisición de materiales; éstos incluyen una bomba, recipiente de almacenamiento, recipiente para el filtro percolador, recipiente para el clarificador, material filtrante, microorganismos y soluciones para controlar el pH del residual. Para la mano de obra y construcción es necesario un monto de \$250 que incluye la contratación de personal que se encargue de construir, montar e instalar el sistema de tratamiento.

Finalmente se estimó un total de \$150 para gastos de operación y mantenimiento que incluye la contratación de un obrero que controle el proceso de filtración y solución de NaOH 0,1 mol/L para el lavado del filtro cada 2 semanas como lo recomiendan Lemji y Eckstädt (2013). Además, es importante considerar montos para la operación porque es indispensable que el ambiente microbiano siempre se encuentre lo más próximo al pH neutro. La operación realizada en el filtro de goteo ayuda a reducir el exceso de biomasa a través de la inactivación del filtro de goteo durante unos días al apagar tanto el flujo de entrada como el flujo de salida durante 3 a 4 días.

**Cuadro 4. 6.** Resumen de la estimación de costos para un filtro percolador

Filtro	Flujo de Aguas Residuales (L)	Costo de construcción (USD)	Mano de obra (USD)	Operación y mantenimiento (USD)	Materiales (USD)
T <sub>1</sub> R <sub>1</sub>	500	100	100	150	180
T <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	500	100	100	150	180
T <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	500	100	100	150	180
T <sub>2</sub> R <sub>1</sub>	500	100	125	150	210
T <sub>2</sub> R <sub>2</sub>	500	100	125	150	210
T <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	500	100	125	150	210
T <sub>3</sub> R <sub>1</sub>	500	100	150	150	250
T <sub>3</sub> R <sub>2</sub>	500	100	150	150	250
T <sub>3</sub> R <sub>3</sub>	500	100	150	150	250

#### Actividad 14. Comprobar la eficiencia económica del filtro

A través de la ecuación utilizada por Nandy *et al.* (2001) se encontró que el monto necesario para la implementación de un sistema de filtro percolador que permita el tratamiento de 500L de vinaza en una planta destiladora de alcohol de Junín requiere una inversión desde \$520 hasta \$650.

**Cuadro 4. 7.** Costos de inversión de un sistema de filtro percolador en función de los diferentes tratamientos

T1	T2	T3
$C_E = CC + MO + OyM + M$	$C_E = CC + MO + OyM + M$	$C_E = CC + MO + OyM + M$
$C_E = 100 + 100 + 150 + 180$	$C_E = 100 + 125 + 150 + 210$	$C_E = 100 + 150 + 150 + 250$
$C_E = 520$	$C_E = 585$	$C_E = 650$

Este monto permitiría que los problemas asociados a la vinaza tanto en el suelo, agua, aire como en la población residente sean controlados y evitados; logrando que la planta se ajuste a criterios de una mejor producción artesanal. Por lo tanto, sería un costo menor en comparación con los gastos asociados a todos los efectos que se pueden desencadenar por el inadecuado manejo de efluentes residuales procedentes de las destiladoras de alcohol.

# CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1. CONCLUSIONES

- La producción de agua residual (vinaza) de la destilería de alcohol en promedio genera un volumen de 321Ly la caracterización físico-químico presenta que este residual no está ajustado a los niveles permisibles contemplados en la normativa, tanto para DQO como para DBO<sub>5</sub>; lo que genera efectos directos en los recursos naturales y la población local.
- El aumento del material filtrante tiene un efecto significativo en la eficiencia de remoción de carga orgánica. Se logró un valor promedio de 86,28% ± 6,5% de eficiencia de eliminación de DQO y un valor de 93,73% ± 6,5% de eficiencia de eliminación de DBO<sub>5</sub> para el tratamiento 3 (40cm de pumita).
- El prototipo del tratamiento de mayor eficiencia, tanto para la construcción del filtro, mano de obra, materiales, operación y mantenimiento, tiene un costo de \$650; lo que permite percibir que tiene una factibilidad económica viable si se lo asocia todos los beneficios ambientales y sociales que éste permitirá en el lugar de funcionamiento.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Instalar un sistema de recirculación para disminuir el tiempo de retención hidráulica del filtro percolador.
- El material filtrante (Pumita) debe ser triturado homogéneamente para garantizar una mayor área de contacto entre el medio y el residual.
- Promover el uso del filtro percolador en una escala operativa en todas las plantas destiladoras para que los costos de construcción e instalación sean menores debido a la demanda.

- Implementar un tratamiento físico químico para que los niveles de concentración sean menores a los límites permisibles.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ali, I., Khan, Z. M., Peng, C; Naz, I; Sultan, M., Ali, M; Niaz, Y. 2017. Identification and Elucidation of the Designing and Operational Issues of Trickling Filter Systems for Wastewater Treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(6).
- Alzate, C. (2015). Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. *Ingenierías USBMed*, 6(2), 36-41.
- ASAE. 2005. Media Filters for Irrigation-Testing and Performance Reporting, ASAE Standards, St. Joseph, MI.
- Aslam, M; Khan, Z; Sultan, M; Niaz, Y; Mahmood, M; Shoaib, M; Ahmad, M. 2017. Performance Evaluation of Trickling Filter-Based Wastewater Treatment System Utilizing Cotton Sticks as Filter Media. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5).
- Bailón, L., Nikolausz, M., Kästner, M., Veiga, M. C., & Kennes, C. (2009). Removal of dichloromethane from waste gases in one-and two-liquid-phase stirred tank bioreactors and biotrickling filters. *Water research*, 43(1), 11-20.
- Becerra Ospina, N. L. Clarificación de vinazas de caña de azúcar por tratamiento fisicoquímico y filtración con membranas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Bhavana, N; Rambabu, C. 2017. Study of mechanical properties of lightweight aggregate concrete by using pumice stone, ceramic tiles and CLC lightweight bricks. Machilipatnam, Andhra Pradesh, India. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vol 04. p 3071.
- Billore, S; Singh, N; Ram, H; Sharma, J; Singh, V; Dass, P. 2001. Treatment of molasses based distillery effluent in a constructed wetland in central India. *Water Science and Technology* 44 (11–12), 441–448.
- Calles, J. 2017. La contaminación del agua en Ecuador. (En línea). Formato HTML. Consultado 06 de dic 2017. Disponible en: <http://www.agua-ecuador.blogspot.com>
- Cannella, D; Henning J. 2014. Do new cellulolytic enzyme preparations affect the industrial strategies for high solids lignocellulosic ethanol production?. *Biotechnology and bioengineering*. Vol 111. p 59-68.
- Chernicharo, C; Nascimento, M. 2001. Feasibility of a pilot-scale UASB/trickling filter system for domestic sewage treatment. *Water Science and Technology*, 44(4), 221-228.
- Çifçi, D; Meriç, S. 2016. A review on pumice for water and wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 57(39), 18131-18143.
- CONSEP (Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas). Estudio sobre el manejo del alcohol etílico en el Ecuador. (En línea). Formato PDF. Consultado: 12 enero 2018. Disponible en: <http://www.consep.gob.ec>

- Christofoletti, C.A., Escher, J.P., Correia, J.E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C.S.(2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste management*, 33 (12), 2752-2761.
- Curbelo, J. M. C., & Acosta, Y. L. (2014). Alternativas de tratamiento de las vinazas de destilería. *Experiencias nacionales e internacionales*.
- Daigger, G; y Boltz, J. (2011) Trickle Filter and Trickle Filter – Suspended Growth Process Design and Operation: A State-of-the-Art Review. *Water Environment Research*, Vol. 83(5). p 388-404.
- Dermou, E, Velissariou; A,Xenos, D; Vayenas, D. 2005. Biological chromium (VI) reduction using a trickle filter. *Journal of hazardous materials*, 126(1), 78-85.
- Díez-Montero, R., Castrillo, M., Casao, M., & Tejero, I. (2019). Model-based evaluation of a trickle filter facility upgrade to biological nutrient removal. *Science of The Total Environment*.
- Eding, E., Kamstra, A., Verreth, J., Huisman, E., & Klapwijk, A. (2006). Design and operation of nitrifying trickle filters in recirculating aquaculture: a review. *Aquacultural engineering*, 34(3), 234-260.
- Ensinas, A; Nebra, S; Lozano, M; Serra, L. M. 2007. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, 48(11), 2978-2987.
- EPA (Agencia de Protección Ambiental). (2000). Trickle Filter Nitrification Wastewater Technology Fact Sheet. USA. (En línea). Formato PDF. Consultado: 12 enero 2018. Disponible en: <https://nepis.epa.gov>.
- Fonseca Martínez, J, García, C. 2016) Evaluación Técnica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Quinta Brasília” Ubicada en el Municipio de Honda-Tolima.
- Fulazzaky M. 2013. Assessing the suitability of stream water for five different uses and its aquatic environment. *Revista científica Environ Monit Assess* Vol. 185(1). p 523-535.
- Galdames Rosas, L; Díaz, A. 2015. Percepción y significado de la piedra en la geografía sagrada de las sociedades andinas. *Runa*. Vol 36(2). p 5-23.
- García-Bernet, D; Buffie´re, P; Elmaleh, S; Moletta, R. 1998. Application of the down-flow fluidized bed to the anaerobic treatment of wine distillery wastewater. *Water Science and Technology* 38 (8–9), 393–399.
- González, M. R. C., Eguiarte, D. R. G., Macías, R. R., Corral, J. A. R., & Puga, N. D. (2018). Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 373-382.
- Gonzalez, T., Terron, M.C., Yague, S., Zapico, E., Galletti, G.C., Gonzalez, A.E., 2000. Pyrolysis/gas chromatography/ mass spectrometry monitoring of fungal-biotreated distillery wastewater using *Trametes* sp. I-62 (CECT 20197). *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 14 (15), 1417–1424.

- Guerrero, I., Ortiz, M., Rodríguez, M. 2016. Pruebas de biodegradabilidad acidogénica y metanogénica de sedimentos obtenidos por floculación química de vinaza alcohólica.
- Gutiérrez, H., & De La Vara, R.(2012). Análisis y diseño de experimentos. México: McGraw-Hill.
- Hofsetz, K; Silva, M. 2012. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass and Bioeng.* Vol 46. p 564–573.
- James, A. (1964). The bacteriology of trickling filters. *Journal of Applied Microbiology*, 27(2), 197-207.
- Jonker, J. 2015. Outlook for ethanol production costs in Brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies. *Applied Energy*. Vol 147. p 593-610.
- Kadam, A; Kanjan, U. 2012. Wastewater treatment of alcohol distillery plant by catalytic thermolysis. Ujjain, India. *Jr. of Industrial Pollution Control*. Vol 28(1). p 51-56.
- Kamali, M., Gameiro, T., Costa, M. E. V., Capela, I. 2016. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes—An overview of the developments and improvement opportunities. *Chemical Engineering Journal*. Vol 298. p 162-182.
- Kemal, N. 2016. A review on pumice for water and wastewater treatment. Turquía. *Revista científica Desalination and Water Treatment*. Vol 57(39). p 18131-18143.
- Kornaros, M, Lyberatos, G. 2006. Biological treatment of wastewaters from a dye manufacturing company using a trickling filter. *Journal of Hazardous Materials*, 136(1), 95-102.
- Kuslu, Y., y Sahin, U. (2013). A comparison study on the removal of suspended solids from irrigation water with pumice and sand–gravel media filters in the laboratory scale. *Desalination and Water Treatment*, 51(10-12), 2047-2054.
- Langenbach, K; Horn, H; y Kästner, M. 2010. Slow sand filtration of secondary effluent for wastewater reuse: Evaluation of performance and modeling of bacteria removal. *Univ. München*.
- Leal, I., Chirinos, E., Leal, M., Morán, H., & Barrera, W. (2003). Caracterización fisicoquímica de la vinaza del Agave cocui y su posible uso agroindustrial. *Multiciencias*, 3(2).
- Lekang, O, Kleppe, H. 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural engineering*, 21(3), 181-199.
- Lemji, H. H., & Eckstädt, H. (2013). A pilot scale trickling filter with pebble gravel as media and its performance to remove chemical oxygen demand from synthetic brewery wastewater. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 14(10), 924-933.
- Lugo, P. L. (2017). *Evaluación del uso de la vinaza (residuo industrial) para la obtención de ácido cítrico empleando aspergillus niger* (Master's thesis).

- Mall, I.D., Kumar, V., 1997. Removal of organic matter from distillery effluent using low cost adsorbent. *Chemical Engineering World XXXII* (7), 89–96.
- METCALF E., EDDY H.P. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. Chapter 9, 4th ed, The McGraw-Hill Companies, New York. 1456, 2003.
- Modesto M, Nebra SA, Zemp RJ. Exergetic cost based analysis to improve the ethanol production from sugar cane biomass. In: *Proceedings of ESDA06: 8th Biennial conference on engineering systems design and analysis*, Turin, Italy, 4–7 July, 2006.
- Montilla, M., Morillo, G., Ramírez, P., Alizo, S. 2017. Impacto ambiental del Central Azucarero Trujillo, SA En la población del municipio Motatán, estado Trujillo. *Sapienza Organizacional*. Vol 9. p 129-158.
- Moraes, B., Zaiat, M., Bonomi, A. 2015. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 44, 888-903.
- Nandy, T., Shastry, S., Kaul, S.N., 2002. Wastewater management in cane molasses distillery involving bioresource recovery. *Journal of Environmental Management* 65 (1), 25–38.
- Olmedo, M. (2005). *Experimentación en química: química orgánica, Ingeniería Química*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, ESP.
- Ospina, N. 2014. Clarificación de vinazas de caña de azúcar por tratamiento fisicoquímico y filtración con membranas.
- Patyal, V. 2015. Treatment of Distillery Wastewater by Anaerobic Methods. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Vol 5(12). p 151-155.
- Rasool, T., Rehman, A., Naz, I., Ullah, R., y Ahmed, S. (2017). Efficiency of a locally designed pilot-scale trickling biofilter (TBF) system in natural environment for the treatment of domestic wastewater. *Environmental technology*. Vol 1-12.
- Revsbech, N. P., Christensen, P. B., Nielsen, L. P., & Sørensen, J. (1989). Denitrification in a trickling filter biofilm studied by a microsensor for oxygen and nitrous oxide. *Water Research*, 23(7), 867-871.
- Satyawali Y, Balakrishnan M. Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: a review. *J Environ Manage* 2008;86:481–97.
- SEMPLEDES. 2017. Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017. Quito, ECU. (En Línea). Consultado 10 de Octubre del 2017. Formato PDF. Disponible en: <http://www.cancilleria.gob.ec>
- Siles, J. A., García-García, I., Martín, A., & Martín, M. A. (2011). Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1-3), 247-253.
- Subrahmanyam, M; Boule, P; Kumari, V; Kumar, D; Sancelme, M; y Rachel, A. 2008. Pumice stone supported titanium dioxide for removal of pathogen in

- drinking water and recalcitrant in wastewater. *Revista científica Solar Energy*. Vol 82(12). p 1099-1106.
- Syutsubo, K., Harada, H., Ohashi, A., Suzuki, H., 1997. An effective start-up of thermophilic UASB reactor by seeding mesophilically grown granular sludge. *Water Science and Technology* 36 (6–7), 391–398.
- Tekerlekopoulou, A. G., Akrotos, C. S., & Vayenas, D. V. (2017). Integrated biological treatment of olive mill waste combining aerobic biological treatment, constructed wetlands, and composting. In *Olive Mill Waste* (pp. 139-159). Academic Press.
- Travieso, L., Sánchez, E., Borja, R., Benítez, F., Raposo, F., Rincón, B., & Jiménez, A. M. (2006). Evaluation of a laboratory-scale stabilization pond for tertiary treatment of distillery waste previously treated by a combined anaerobic filter–aerobic trickling system. *ecological engineering*, 27(2), 100-108.
- Tulcan, 2011 Obtención de alcohol a partir de jugo de caña, cachaza y melaza, mediante la incorporación de dos niveles de fermento (*Saccharomyces cerevisiae*).EC (En línea). Consultado el 28 de Oct. 2017. Formato PDF. Disponible en [repositorio.utn.edu.ec](http://repositorio.utn.edu.ec).
- TULSMA (Texto Unificado Legislación Secundaria del Medio Ambiente). 2014 Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Quito, EC. (En Línea). Consultado, 10 de Octubre del 2017. Formato PDF. Disponible en: <http://www.industrias.ec>.
- Valenzuela, I., Jesús, P., y Vargas Dávila, E. 2010. Tratamiento anaerobio de las vinazas provenientes de la industria Pisquera mediante reactores UASB a escala piloto.
- Velástegui, V., & Hugo, V. (2018). *Análisis de la piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Centro de Faenamiento Ocaña del cantón Quero* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).
- Vorion Chemicals & Distilleries Ltd., 1999. Distillery Effluent Treatment and Gold Fish Culture Project, /<http://www.ias.unu.edu>.
- Zylka, R., Dabrowski, W., Gogina, E., & Yancen, O. (2018). Trickling Filter for High Efficiency Treatment of Dairy Sewage. *Journal of Ecological engineering*, 19 (4).

## **ANEXOS**

**ANEXO 1. Valores de los niveles de DBO<sub>5</sub> en función del TRH**

Tratamientos	Espesor de capa de pumita (cm)	TRH (días)	Repetición 1 (mg/l)	Repetición 2 (mg/l)	Repetición 3 (mg/l)	Promedio
T1	20 cm	5	21808,00	21808,00	21808,00	21808,00
		10	19256,00	19256,00	19256,00	19256,00
		15	12992,00	12992,00	12992,00	12992,00
		20	8816,00	8816,00	8816,00	8816,00
		25	11136,00	10904,00	11832,00	11290,67
		30	9512,00	9512,00	9512,00	9512,00
T2	30 cm	5	21112,00	20880,00	21112,00	21034,67
		10	17864,00	17864,00	17864,00	17864,00
		15	9744,00	9744,00	9744,00	9744,00
		20	4408,00	4408,00	4408,00	4408,00
		25	6032,00	6496,00	5800,00	6109,33
		30	5568,00	5568,00	5568,00	5568,00
T3	40 cm	5	19766,40	19836,00	19720,00	19774,13
		10	15033,60	14940,80	15056,80	15010,40
		15	6542,40	6728,00	6403,20	6557,87
		20	1160,00	1392,00	1392,00	1314,67
		25	2946,40	2969,60	2900,00	2938,67
		30	4152,80	4083,20	4106,40	4114,13

**ANEXO 2.** Valores de los niveles de DQO en función del TRH

Tratamientos	Espesor de capa de pumita (cm)	TRH (días)	Repetición 1 (mg/L)	Repetición 2 (mg/L)	Repetición 3 (mg/L)	Promedio
T1	20 cm	5	21315,84	21093,80	21382,45	21264,03
		10	20205,64	19761,56	19850,38	19939,19
		15	15986,88	14654,64	15098,72	15246,75
		20	10879,96	11324,04	10657,92	10953,97
		25	10657,92	11768,12	10879,96	11102,00
		30	11324,04	11768,12	11324,04	11472,07
T2	30 cm	5	20427,68	20427,68	20472,09	20442,48
		10	16430,96	16208,92	16275,53	16305,14
		15	9325,68	9325,68	9325,68	9325,68
		20	6883,24	6439,16	7327,32	6883,24
		25	7327,32	7771,40	7105,28	7401,33
		30	8437,52	8437,52	8659,56	8511,53
T3	40 cm	5	19361,89	18984,42	19221,26	19189,19
		10	17097,08	15986,88	16653,00	16578,99
		15	6261,53	6439,16	6276,33	6325,67
		20	2886,52	3108,56	3182,57	3059,22
		25	3552,64	3375,01	3419,42	3449,02
		30	3774,68	3996,72	3996,72	3922,71

**ANEXO 3. Eficiencia remoción DBO<sub>5</sub> en función del TRH**

Tratamientos	Espesor de capa de pumita (cm)	TRH (días)	Repetición 1 (%)	Repetición 2 (%)	Repetición 3 (%)
T1	20 cm	5	1,78	1,78	1,78
		10	13,28	13,28	13,28
		15	41,49	41,49	41,49
		20	60,30	60,30	60,30
		25	49,85	50,89	46,71
		30	57,16	57,16	57,16
T2	30 cm	5	4,92	5,96	4,92
		10	19,55	19,55	19,55
		15	56,12	56,12	56,12
		20	80,15	80,15	80,15
		25	72,83	70,74	73,88
		30	74,92	74,92	74,92
T3	40 cm	5	10,98	10,66	11,19
		10	32,29	32,71	32,19
		15	70,54	69,70	71,16
		20	94,78	93,73	93,73
		25	86,73	86,63	86,94
		30	81,30	81,61	81,51

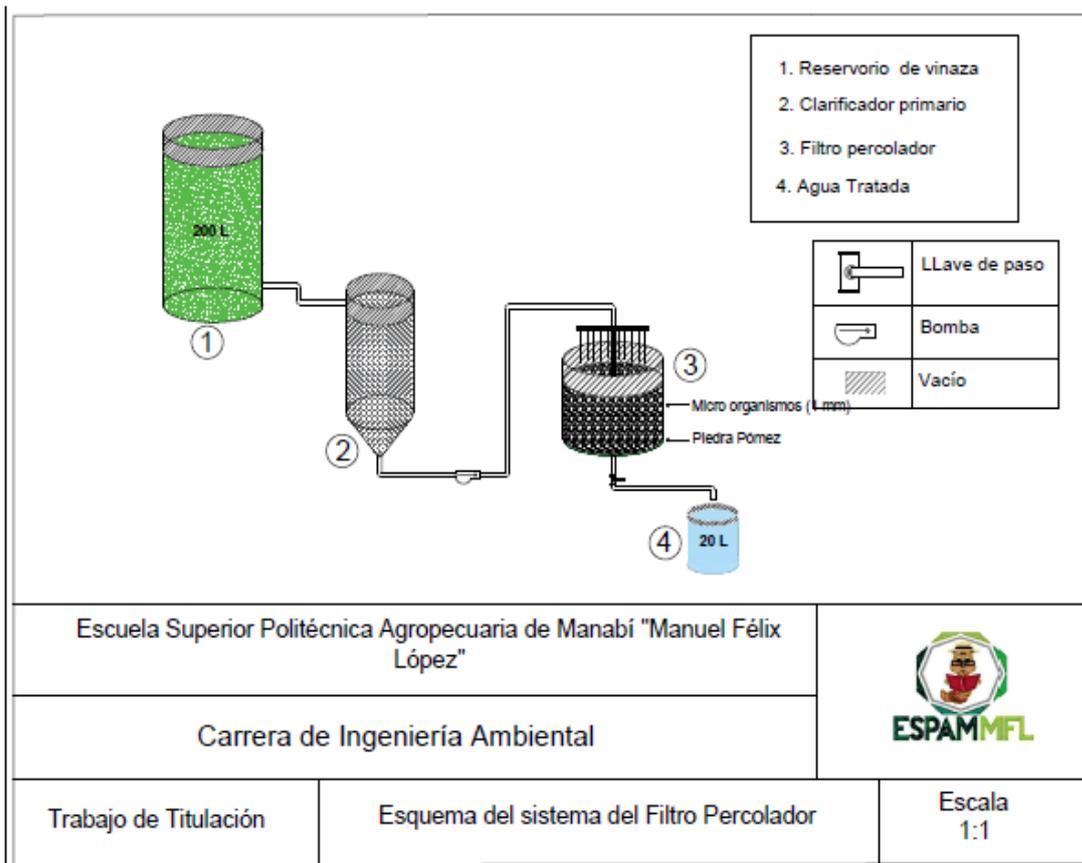
**ANEXO 4. Eficiencia remoción DQO en función del TRH**

Tratamientos	Espesor de capa de pumita (cm)	TRH (días)	Repetición 1 (%)	Repetición 2 (%)	Repetición 3 (%)
T1	20 cm	5	8,12	9,08	7,83
		10	12,91	14,82	14,44
		15	31,09	36,83	34,92
		20	53,10	51,19	54,06
		25	54,06	49,28	53,10
		30	51,19	49,28	51,19
T2	30 cm	5	11,95	11,95	11,76
		10	29,18	30,13	29,85
		15	59,80	59,80	59,80
		20	70,33	72,25	68,42
		25	68,42	66,50	69,37
		30	63,63	63,63	62,67
T3	40 cm	5	16,54	18,17	17,15
		10	26,31	31,09	28,22
		15	73,01	72,25	72,95
		20	87,56	86,60	86,28
		25	84,69	85,45	85,26
		30	83,73	82,77	82,77

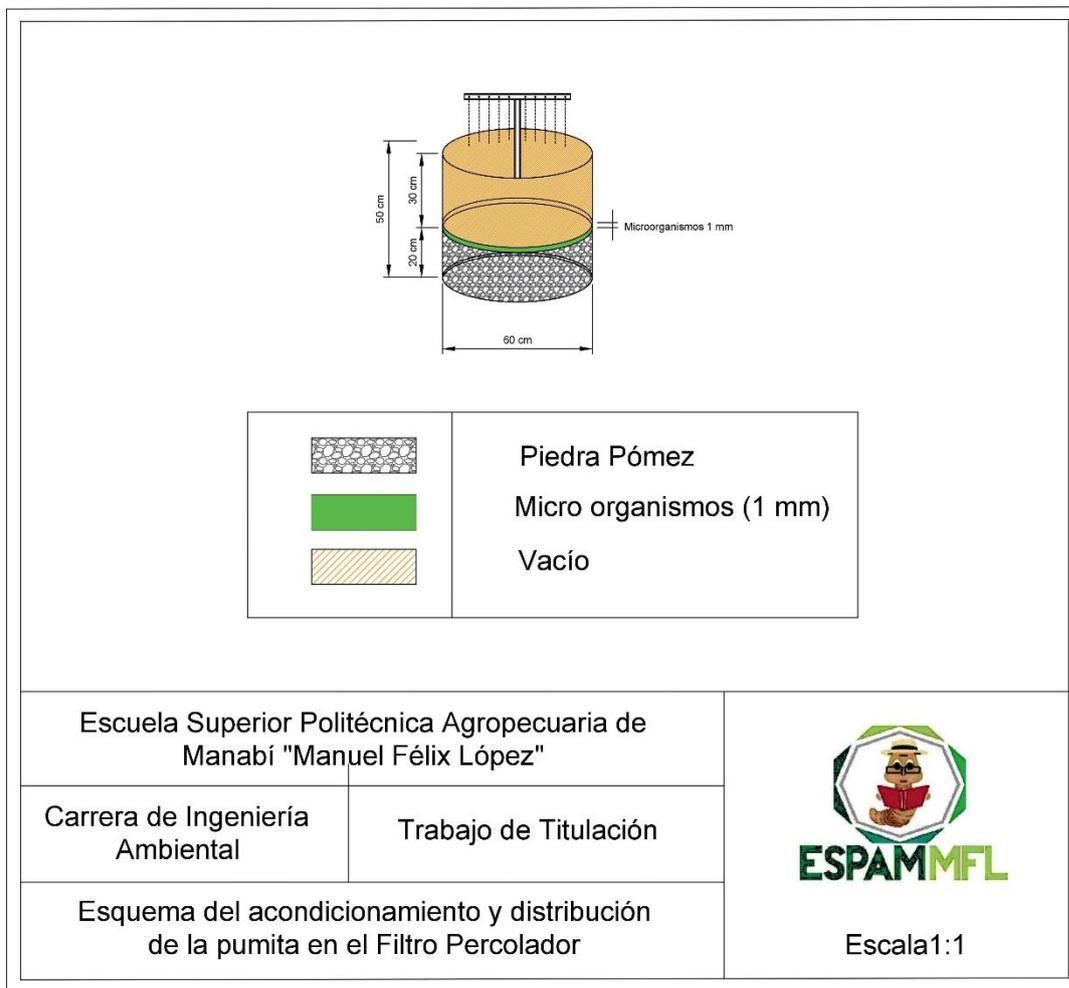
**ANEXO 5. Resultados de los análisis de parámetros físico-químicos iniciales de la vinaza en los tres horarios de monitoreo**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>8H00</b>	<b>13H00</b>	<b>16H00</b>	<b>PROM</b>
pH	---	2,85	3,5	3,4	3,25
Sólidos totales	g/L	22,89	21,92	23,59	22,8
Turbidez	---	24.00	18.00	21.00	21.00
Color	---	328.00	304.00	316.00	316.00
Temperatura	°C	25,3	25,4	25,5	25,4
Conductividad	ms	8,45	8,73	8,53	8,57
Curva de titulación de la vinaza	NaOH/mL vin	13,00	12,3	12,8	12,65
DQO	mg/dm <sup>3</sup>	23639,00	23186,00	22775,00	23200,00
DBO <sub>5</sub>	mg/dm <sup>3</sup>	22101,00	22296,00	22215,00	22204,00

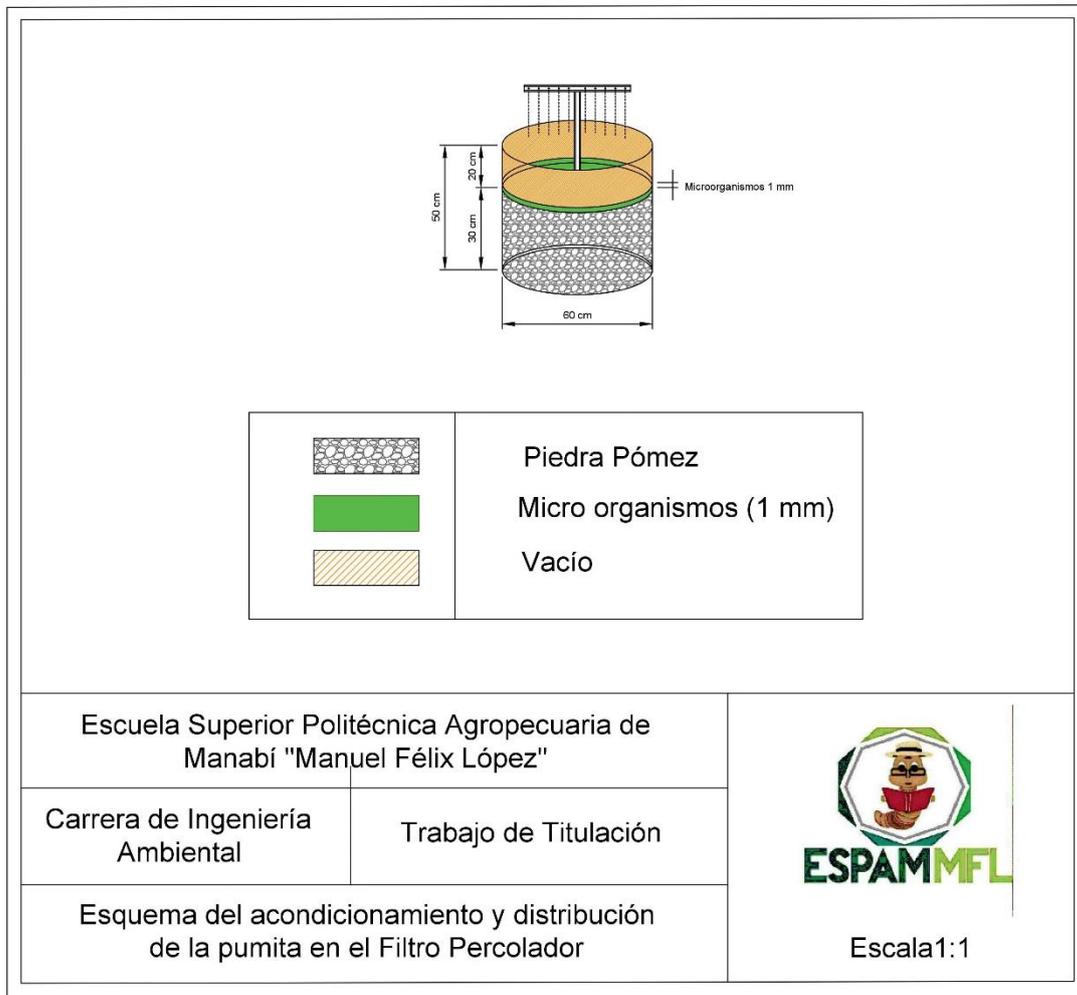
**ANEXO 6.** Esquema del sistema del filtro percolador de acuerdo al experimento



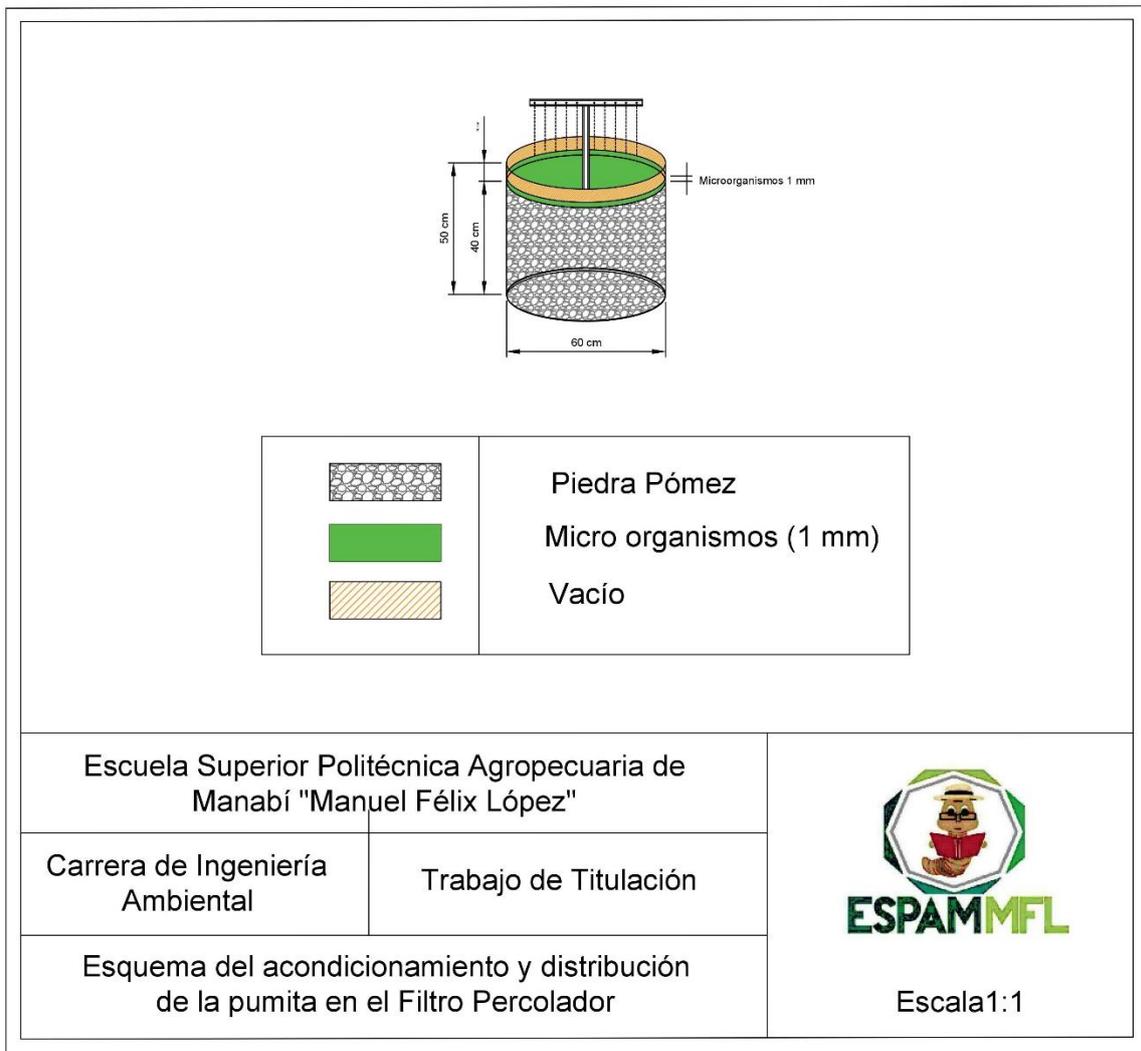
### ANEXO 7. E Esquema del acondicionamiento y distribución de la pumita en el filtro percolador1



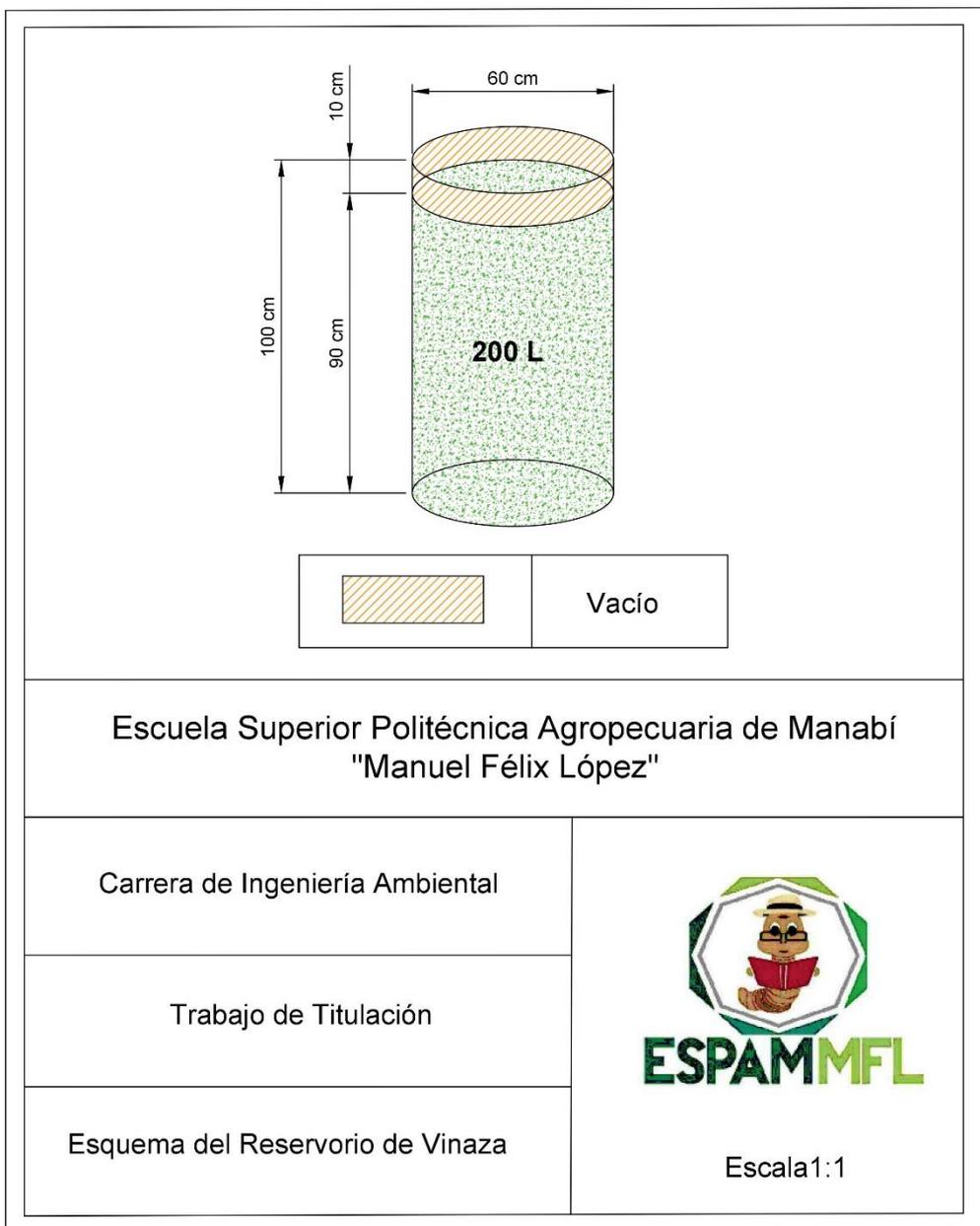
**ANEXO 8. E** Esquema del acondicionamiento y distribución de la pumita en el filtro percolador<sup>2</sup>

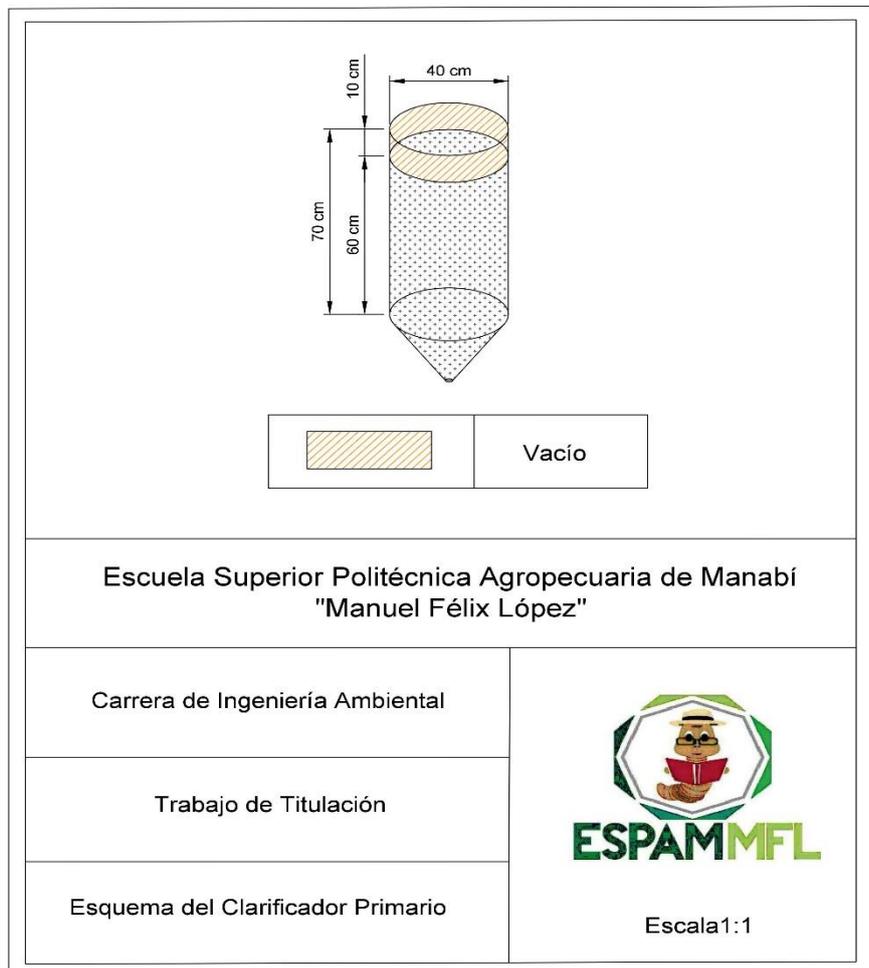


### ANEXO 9. E Esquema del acondicionamiento y distribución de la pumita en el filtro percolador<sup>3</sup>



### ANEXO 10. Esquema del tanque de vinaza



**ANEXO 11. Esquema del clarificador**

**ANEXO 12. Toma de muestra de la destilería de alcohol****ANEXO 13. Equipo de tratamiento**

**ANEXO 14. Análisis en el laboratorio**

## ANEXO 15. Certificación de analisis



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

**LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y SUELOS**

Calceta 17, de Abril 2019

**CERTIFICACIÓN**

Por medio de la presente certifico que Solórzano Vargas Freddy Steven con CI 1313230136 egresado de la carrera de Ing. Ambiental de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "MFL", realizo análisis físico-químicos (DBO<sub>5</sub>, DQO, TDS, pH, turbidez y color) para llevar acabo el proyecto de titulación "Evaluación de la carga orgánica residuales en la destilería de alcohol con filtro percolador aeróbico utilizando pumita"

Prácticas que estuvieron supervisadas bajo el personal del laboratorio química ambiental

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

Atentamente

  
Ing. Fabian Peñarrieta M.  
Técnico