

**EVALUACIÓN DE FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE EN LA
REMOCIÓN DE DBO5 Y DQO UTILIZANDO DIFERENTES MATERIALES
RECICLABLES COMO MEDIO FILTRANTE EN LA UNIVERSIDAD DE
NARIÑO**

MARIA DEL CARMEN CORDOBA

JOSE LUIS PORTILLA ERAZO

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PASTO, NARIÑO**

2016

**EVALUACIÓN DE FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE EN LA
REMOCIÓN DE DBO5 Y DQO UTILIZANDO DIFERENTES MATERIALES
RECICLABLES COMO MEDIO FILTRANTE EN LA UNIVERSIDAD DE
NARIÑO**

MARIA DEL CARMEN CORDOBA

JOSE LUIS PORTILLA ERAZO

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Ambiental**

Director:

I.S.A. James Rosero I.C.

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PASTO, NARIÑO**

2016

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores. Artículo 1° del acuerdo No. 324 de Octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, Agosto de 2016

RESUMEN

Las aguas residuales domésticas generadas por la Universidad de Nariño, son vertidas al río Pasto sin ningún tratamiento previo, así, surgió la presente investigación, la cual evaluó la eficiencia de remoción de DBO₅ y DQO de 3 filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), utilizando elementos reciclables como medios de soporte, para el tratamiento de las aguas residuales, que se descargan a través del colector principal. El diseño de los reactores a escala piloto, inició con la caracterización fisicoquímica del agua proveniente de la Universidad de Nariño, además de la determinación del caudal de diseño, en base a la metodología propuesta por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000) y Tchobanoglous (2004).

Una vez determinada la composición fisicoquímica, se definió las variables de diseño y se implementaron los reactores en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias Agrícolas. Finalmente, se evaluaron las eficiencias de remoción de DBO₅ y DQO, en un periodo de 11 semanas. Desde la primera semana, se tomaron muestras a la entrada y salida de los filtros. Durante todo el proceso, se alimentaron los reactores con un flujo continuo y se verificaron el pH y la temperatura, para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema. Con un tiempo de retención hidráulica igual a 5,25 horas en los filtros, se obtuvo una remoción máxima de DBO₅ de 90,47%, 83,49% y 82,33% y DQO 80,22%, 71,53% y 77,01% para escombros, tapas y vasos, respectivamente, esto demostró que los elementos reciclables contribuyen al tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: Tratamiento biológico, vertimiento, filtro anaerobio de flujo ascendente.

ABSTRACT

Domestic wastewater generated by the University of Nariño, are discharged into the Pasto River without any treatment, thus, this research started, which evaluated the efficiency of removal of BOD and COD in 3 upflow anaerobic filters using recyclable items as packing medium for the treatment of wastewater, which is discharged through the main collector. The design of pilot scale reactors started with a physicochemical characterization of water from the University of Nariño, and the design flow was determined, based on the methodology proposed by Technical Regulations Sector Drinking Water and Sanitation (2000) and Tchobanoglous (2004).

Once the physicochemical composition was determined, we defined the design variables and the reactors were built in the Laboratory of the Faculty of Agricultural Sciences. Finally, removal efficiencies of BOD₅ and COD were evaluated over a period of 11 weeks. Since the first week, samples of the influent and effluent of the filters were taken. During all the process, the reactors were fed with a continuous flow and the pH and temperature were checked to ensure optimal system performance. With a hydraulic retention time equal to 5.25 hours on the filters, a maximum BOD₅ removal of 90.47%, 83.49% and 82.33% and COD removal of 80.22%, 71.53% 77.01% was obtained for rubble, plastic lids and cups, respectively. This showed that the recyclable elements contribute to wastewater treatment.

Keywords: Biological treatment, Shedding, upflow Anaerobic filter.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	iii
GLOSARIO	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
MATERIALES Y MÉTODOS.....	2
Diseño de los filtros a escala piloto	2
Implementación del sistema piloto	3
Remoción de DBO ₅ y DQO en los FAFA	4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	5
Diseño de los filtros a escala piloto	5
Implementación del sistema piloto	7
Determinación de la remoción de DBO ₅ y DQO.....	7
CONCLUSIONES.....	14
RECOMENDACIONES	15
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de agua residual Universidad de Nariño, sede Torobajo.	5
Tabla 2. pH y T° promedio en los FAFA.	7
Tabla 3. Porcentajes de Remoción de DBO ₅ en los tres FAFA.....	11
Tabla 4. Porcentajes de Remoción de DQO en los tres FAFA.....	13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño estructural de los FAFA.....	6
Figura 2. Comportamiento de la DBO ₅ en el FAFA con escombros.	8
Figura 3. Comportamiento de la DQO en el FAFA con escombros.	8
Figura 4. Comportamiento de la DBO ₅ en el FAFA con Tapas.....	9
Figura 5. Comportamiento de la DQO en el FAFA con Tapas.	10
Figura 6. Comportamiento de la DBO ₅ en el FAFA con Vasos.....	10
Figura 7. Comportamiento de la DQO en el FAFA con Vasos.....	11

LISTA DE ABREVIATURAS

A: Área

°C: Grados Centígrados

CH₄: Metano

cm: Centímetros

DBO: Demanda biológica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

FAFA: Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

g: Gramo

H: Altura

kg: Kilogramo

L: Litro

m: Metro

m²: Metro cuadrado

m³: Metro cúbico

mm: Milímetro

Q: Caudal

RAS: Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico

T°: Temperatura

TRH: Tiempo de retención hidráulica

V: Velocidad

GLOSARIO

Afluente: Agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o algún proceso de tratamiento.

Aguas residuales: Agua que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria.

Análisis: Examen del agua en donde se realizan pruebas fisicoquímicas, pruebas biológicas y microbiológicas efectuadas por un laboratorio.

Biodegradación: Degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos sobre el suelo, aire, cuerpos de agua receptores o procesos de tratamiento de aguas residuales.

Biopelícula: Película biológica adherida a un medio sólido que lleva a cabo la degradación de la materia orgánica.

Carga orgánica: Producto de la concentración media de DBO por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (kg/d) o en miligramos por litro (mg/L).

Caudal (Q): Cantidad de volumen de agua o fluido, que se mueve en un tiempo determinado, suele medirse en metros cúbicos sobre segundo (m^3/seg).

Concentración: La concentración se refiere a la cantidad de soluto o contaminante que hay en una masa o volumen determinado de solución, solvente o agua.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20 °C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas.

Depuración: Eliminación de sustancias o impurezas contenidas en el agua.

Descomposición anaerobia: Degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular por efecto de microorganismos. Usualmente va acompañada de la generación de ácidos y gas metano.

Digestión anaerobia: Descomposición biológica de la materia orgánica de un lodo en ausencia de oxígeno.

Disposición final: última etapa de eliminación de los desechos o residuos sólidos.

Eficiencia de tratamiento: Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje.

Efluente: Líquido que sale de un proceso de tratamiento.

Escombro: Conjunto de fragmentos o restos resultantes de ladrillos, hormigón, argamasa, acero, hierro, madera, entre otros, provenientes de los desechos de la construcción, remodelación o demolición de estructuras.

Filtro Anaerobio: Consiste en una columna llenada con varios tipos de medios sólidos usados para el tratamiento de la materia orgánica carbonácea en aguas residuales.

Inoculación: proceso mediante el cual se utiliza lodo con una alta actividad metanogénica específica, proveniente de un reactor anaerobio, que maneja aguas de calidad similar, objeto de inoculación, para ser introducidos en otro reactor, con el fin de acelerar el proceso de arranque.

Lodo: producto final semisólido de la depuración de aguas residuales. La mayoría de las aguas residuales tratadas son urbanas o industriales. El fango procedente de las depuradoras de aguas residuales urbanas se denomina biosólido.

Muestra compuesta: Mezcla de varias muestras alícuotas instantáneas recolectadas en el mismo punto de muestreo en diferentes tiempos. La mezcla se hace sin tener en cuenta el caudal en el momento de la toma.

Medio de soporte: es el relleno que se ubica dentro de la planta de tratamiento: de un material especial que permite la adherencia de los microorganismos para la conformación de una biopelícula.

Proceso anaerobio: proceso desarrollado en ausencia de oxígeno.

Plásticos: Polímeros que se moldean a partir de la presión y el calor, compuestos por resinas, proteínas y otras sustancias y que pueden modificar su forma.

Tiempo de retención hidráulica: Tiempo medio teórico que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil.

Tratamiento anaerobio: Estabilización de un desecho por acción de microorganismos en ausencia de oxígeno.

Vertimiento: Cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o a un alcantarillado.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de las aguas residuales, genera un sinnúmero de problemas de carácter ambiental, político, social y económico, que demanda soluciones acordes con las capacidades tecnológicas de cada comunidad (Suarez, 2006).

La presente investigación aborda la problemática relacionada con el vertimiento de aguas residuales domésticas provenientes de la Universidad de Nariño, al río Pasto. Este vertimiento, ha sido permanente y directo sobre el cauce, entonces surge la necesidad de incorporar un sistema de tratamiento de aguas residuales, para mitigar y minimizar el impacto generado y garantizar el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, en cuanto al vertimiento de aguas residuales y además debe ser factible económicamente (MINAMBIENTE, 2015).

Se propuso un sistema que ofrece simplicidad de control y fácil construcción, de ésta manera se diseñó y se puso en marcha, 3 filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), los cuales permiten incorporar materiales alternos que ayudan a reducir costos de construcción. De esta manera, se evaluó la eficiencia de remoción de DBO₅ y DQO de los filtros anaerobios de flujo ascendente, utilizando elementos reciclables como medios de soporte, en el tratamiento de aguas residuales. Para esto, se instaló tres filtros a escala piloto, los cuales utilizaron tres medios filtrantes de materiales alternativos, que reducen costos de construcción y operación. Por tal motivo, se tomó como referencia estudios realizados con materiales no convencionales, como son la guadua, bambú, cáscara de coco, tejas de barro y otros más sofisticados como anillos sintéticos y matrices plásticas (Batero y Cruz, 2007).

La evaluación, se realizó durante 11 semanas; cabe destacar que los elementos utilizados para el montaje de los filtros, fueron materiales reciclados, considerando en términos de desarrollo sostenible, a los residuos sólidos como un recurso y no como un residuo (Parrado, 2012).

Los temas tratados, son expuestos de manera sistemática y secuencial, para facilitar el seguimiento de la investigación efectuada.

El presente documento contiene los capítulos referentes a la descripción de la metodología, discusión y análisis de los resultados, donde se concluyó que la fase de inoculación de los materiales filtrantes, fue un proceso muy importante para acelerar la estabilización de los filtros y la formación de la biopelícula. También cabe destacar que los filtros más eficientes fueron los que contenían escombros y vasos como medio filtrante, ya que lograron porcentajes de remoción mayores a 80%.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias Agrícolas, de la Universidad de Nariño, con coordenadas $1^{\circ}12'13''\text{N}$ y $77^{\circ}15'23''\text{O}$. En uno de los costados de la institución, circula el cauce del río Pasto, en donde se realiza el vertimiento de las aguas residuales.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se realizó una serie de actividades, que se desarrollaron en tres etapas, con la obtención de tres productos.

Diseño de los filtros a escala piloto

Para determinar el diseño de los filtros anaerobios, inicialmente se realizó una revisión bibliográfica, y se determinaron los parámetros para el diseño hidráulico de los reactores, según el título E del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, en adelante RAS 2000, (MinDesarrollo, 2000) y se complementó con las recomendaciones propuestas por Tchobanoglous, (2004) y Sperling y Chernicharo, (2005).

Caracterización del Agua Residual. Se realizó, siguiendo los pasos estipulados por la norma Técnica NTC-ISO 5667-2 (ICONTEC, 1995); tomando tres (3) muestreos compuestos al final del conducto de desagüe de la Universidad de Nariño, sede Torobajo, en donde se realiza la descarga del agua residual al río Pasto.

Para el análisis fisicoquímico, las muestras se entregaron al Laboratorio de Análisis Químico y de Aguas de la Universidad de Nariño, certificado por el IDEAM (2015), mediante

Resolución 3566 de 2014, donde se analizaron los siguientes parámetros: pH, temperatura, DBO₅ y DQO.

Determinación del caudal de diseño. Se tuvo en cuenta el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la porosidad del medio filtrante, como se estipula en el RAS 2000 (MinDesarrollo, 2000). Se empleó la metodología de Alonso, (2013) para determinar la porosidad de cada uno de los materiales. Para minimizar los errores durante la prueba, se realizó el procedimiento tres (3) veces para cada medio filtrante.

Una vez calculada la porosidad del material filtrante y establecido el tiempo de retención hidráulico, se calculó el volumen útil de los recipientes, con el cual, se determinó el caudal de entrada y se fijó el diseño de los reactores, tomando en cuenta las recomendaciones del RAS 2000, (MinDesarrollo, 2000) Sperling y Chernicharo, (2005) y Tchobanoglous, (2004).

Implementación del sistema piloto

Recolección del medio filtrante. Se utilizó como medio filtrante, escombros de tipo concreto, proveniente de una escombrera cercana. Este material se encontraba dispuesto en fragmentos de gran tamaño, por tal motivo fue necesario reducirlos a tamaños menores. Para el segundo filtro se recolectaron tapas de botella, diariamente, durante tres semanas.

Para el tercer FAFA, se reunieron vasos plásticos, estos fueron modificados realizando cuatro cortes verticales en cada vaso y luego se replegó para reducir el tamaño de ellos, con el objetivo de lograr una mejor distribución y contacto del fluido, y así ordenar el medio filtrante en el FAFA. Todos estos materiales, fueron recolectados de los residuos generados en las instalaciones de la Universidad de Nariño, sede Torobajo.

Inoculación del material filtrante. Se realizó según la metodología propuesta por Maldonado y Ramón (2006), con lodos provenientes de una laguna de anaerobia, utilizada para el tratamiento de agua residual de la empresa frigorífico Frigovito Jongovito S.A. El lodo fue mezclado con agua residual de la Universidad de Nariño, en una relación de 70:30, con el propósito de que las bacterias se adapten a las condiciones de este tipo de agua (Echevarría, 2013), hasta que la biopelícula se formó sobre los medios filtrantes de cada

filtro. Paralelamente al periodo de inoculación, se realizó la construcción y montaje de los reactores en el laboratorio, según la configuración propuesta por Castaño, (2003).

Construcción del Sistema. Para la construcción de los filtros anaerobios, se reutilizaron recipientes plásticos con las siguientes características: 18,92 litros de capacidad, 36 cm de altura y un diámetro igual a 27 cm, y las recomendaciones del RAS 2000, (MinDesarrollo, 2000) Sperling y Chernicharo, (2005) y Tchobanoglous, (2004).

El filtro está compuesto por: la zona de entrada, que incluía un falso fondo, y un sistema de flauta; zona filtrante, separada del falso fondo empleando una lámina circular de plástico con orificios; y zona de salida, dividida en 2 secciones del mismo tamaño, la primera es una zona clarificadora y la segunda, una zona libre donde circula el metano.

Montaje y arranque del sistema. Los FAFA, se instalaron en paralelo, de tal manera que no obstruyeran el flujo de agua residual entre ellos. Para la alimentación de los filtros, se tomó agua residual del colector principal y se condujo hacia el tanque de almacenamiento. Para ejercer presión suficiente y garantizar el flujo continuo de agua hacia los FAFA se utilizó un tanque de almacenamiento con capacidad de 700 L, instalado a 1.40 m de altura, por encima de los FAFA. El control del caudal de entrada a los filtro, se realizó diariamente, ajustando las llaves de paso.

Después de instalar los FAFA, se recolectó el agua residual, desde el conducto de desagüe hasta el tanque de almacenamiento, durante el mediodía, ya que se evidenciaba mayor actividad en la Universidad durante estas horas, puesto que, cuando hay mayor población, se descarga mayor carga contaminante (Crites y Tchobanoglous, 2003). Después de llenar el tanque, se inició la circulación y arranque de los FAFA.

Remoción de DBO₅ y DQO en los FAFA

Los filtros operaron durante 11 semanas. La toma de muestras se realizó en el tubo de salida, instalado en la parte superior de los FAFA, en donde se recibe y evacua el efluente. Las muestras se entregaron al Laboratorio de Análisis Químico y de Aguas, donde se realizó el análisis fisicoquímico. Se analizaron los resultados y se determinó la eficiencia de remoción de los diferentes lechos filtrantes para los parámetros de DBO₅ y DQO.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño de los filtros a escala piloto

Caracterización del agua residual. Los resultados se encuentran dentro del rango de aguas residuales domésticas típicas, con valores cercanos a los establecidos por Sperling, (2012) que varían entre 200 a 400 mg/L de DBO₅ y 450 a 800 mg/L de DQO (Tabla 1). Los valores superan los límites máximos permisibles señalados por la Resolución 0631 de 2015, es decir, para cumplir con la norma, las aguas residuales deben permanecer por debajo de 90 mg/L de DBO₅ y 200 mg/L de DQO (MINAMBIENTE, 2015).

La relación DQO/DBO₅ es intermedia con un valor mayor a 2.5, por tanto la fracción biodegradable no es elevada y si es factible realizar estudios para verificar la viabilidad del tratamiento biológico (Sperling, 2012).

Tabla 1. Caracterización de agua residual Universidad de Nariño, sede Torobajo.

Fecha	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Relación DQO/DBO ₅
11/02/2015	302	122	2,48
25/03/2015	250	63,7	3,92
06/05/2015	500	188	2,66
03/06/2015	870	296	2,94
Promedio	480,5	167,425	2,87

Determinación del Caudal de Diseño. Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 1, el valor de la DBO₅ está entre 80 y 300, tomando como referencia la metodología propuesta por el RAS 2000, se calculó el tiempo de retención hidráulica, dando como resultado 5,25 horas, que concuerda con los valores recomendados por Sperling y Chernicharo, (2005).

La porosidad de los materiales a implementar como medio filtrante, fueron las siguientes: escombros 56%, tapas 78% y vasos 96%, valores que coincidieron con los indicados en el RAS 2000 (MinDesarrollo, 2000).

Siguiendo la metodología propuesta, se determinó que los filtros tienen un volumen igual a 13.741,32 cm³; teniendo en cuenta el volumen, la porosidad de los medios filtrantes y el TRH, se calculó el caudal de diseño para cada uno de los FAFA, siendo este último parámetro

el más importante para aguas residuales con bajas concentraciones (Romero, 1999; Young, 1991):

- FAFA con escombros: $Q = 0,407 \text{ cm}^3/\text{s}$
- FAFA con tapas: $Q = 0,57 \text{ cm}^3/\text{s}$
- FAFA con vasos: $Q = 0,698 \text{ cm}^3/\text{s}$

Estos caudales y la velocidad de flujo presentada a continuación, cumplen con los requerimientos de Tchobanoglous, (2004) y Sperling y Chernicharo, (2005):

- FAFA con escombros $V = 0,61 \text{ m/h}$
- FAFA con tapas $V = 0,86 \text{ m/h}$
- FAFA con vasos $V = 1,05 \text{ m/h}$

Calculo de las Dimensiones de los filtros. Se calcularon, teniendo en cuenta que cumplan con las recomendaciones expresadas por el RAS 2000, (MinDesarrollo, 2000) Tchobanoglous, (2004) y Sperling y Chernicharo, (2005), de tal manera, que las dimensiones de los filtros se definieron como se muestra en la figura 1. A partir de este diseño se realizó la evaluación de los filtros y el análisis de los resultados, el cual se presenta más adelante.

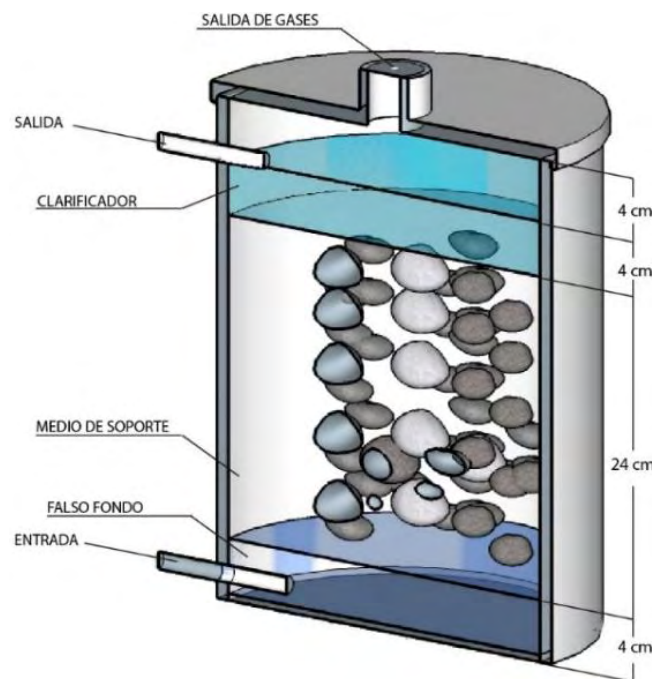


Figura 1. Diseño estructural de los FAFA

Implementación del sistema piloto

Inoculación del material filtrante. Este proceso se llevó a cabo durante un periodo de treinta (30) días, hasta denotar la formación de la biopelícula en los tres medios filtrantes (escombros, 763 tapas y 72 vasos), acorde con la investigación realizada por Maldonado y Ramón, (2006). El lodo utilizado para la inoculación, contenía bacterias aclimatadas a temperaturas inferiores a 20 °C, lo cual favoreció la formación de la biopelícula en este periodo de tiempo.

Construcción, montaje y arranque del sistema. Este proceso se realizó paralelamente a la inoculación de los materiales filtrantes. Después de construir los filtros, se realizaron pruebas hidráulicas, esto demostró que los filtros operaron sin ninguna falla hidráulica. Después, se inició el arranque y funcionamiento de los FAFA.

Determinación de la remoción de DBO₅ y DQO

El muestreo se realizó siguiendo la norma Técnica NTC-ISO 5667-2 (ICONTEC, 1995). Durante 11 semanas se tomaron muestras puntuales en el afluente y después de cada uno de los tres filtros, posteriormente se entregaron al Laboratorio de Análisis Químico y de Aguas, para su respectivo análisis.

Los valores de pH se mantuvieron entre 6,5 y 8,0 y las temperaturas fueron superiores a 15 °C, en los tres filtros, como lo recomiendan Tchobanoglous, (2004) y Sperling y Chernicharo, (2005). Los valores promedio se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. pH y T° promedio en los FAFA.

FAFA	1	2	3
pH	7,6	7,5	7,4
T° (°C)	18,5	18,6	18,9

FAFA con Escombros. Los valores de la DBO₅ para el afluente varían constantemente, sin embargo, los valores del efluente se muestran más estables, esto indica que hubo remoción permanente a partir de la segunda semana. En la primera semana no hubo remoción, como consecuencia del proceso de adaptación de las bacterias al sustrato (figura 2). El valor de

DBO₅ para el afluente y efluente durante la semana 9 se mantuvo muy cercano, eso puede ser debido a que el valor de pH se encontraba en 6.6, es decir, levemente sobre el límite, en otras palabras el filtro anaerobio de flujo ascendente funciona adecuadamente con valores de pH entre 6.5 y 8.0 (Lettinga *et al*, 1996; Romero, 1999).

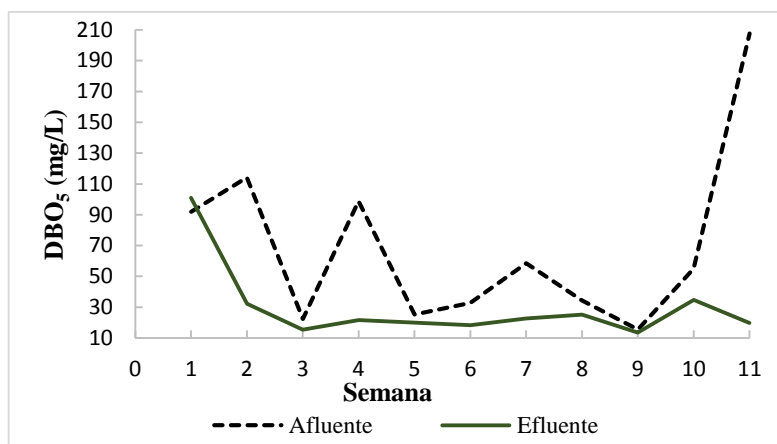


Figura 2. Comportamiento de la DBO₅ en el FAFA con escombros.

El valor de DQO de entrada, tiene un comportamiento muy similar a los valores de DBO₅, sin embargo, el valor de DQO de salida permanece siempre constante como se muestra en la figura 3, esto permite notar un funcionamiento óptimo del filtro y remoción de DQO a lo largo del lecho filtrante (Sperling y Chernicharo, 2005). Exceptuando la semana 10, se garantizó valores de DQO por debajo del límite máximo permisible en todo el proceso de evaluación, según la Resolución 0631 de 2015 (MINAMBIENTE, 2015).

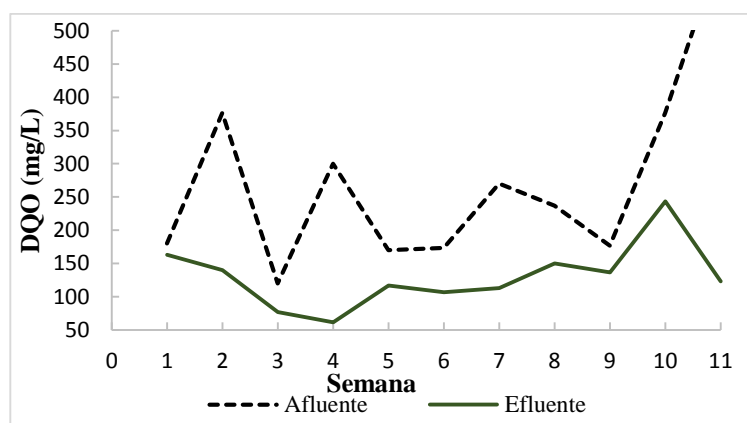


Figura 3. Comportamiento de la DQO en el FAFA con escombros.

FAFA con Tapas. En la Figura 4, se evidencian valores constantes en el efluente, a partir de la segunda semana, sin embargo, se muestran periodos de inestabilidad, con valores similares

tanto en el afluente como en el efluente, esto puede ser, debido a que los valores de DBO₅ en el agua residual varían constantemente generando fluctuaciones en la remoción, (Babbitt y Baumann, 1998; Crites y Tchobanoglous, 2003). A pesar de la variabilidad en los valores de DBO₅ del afluente, el FAFA con tapas garantizó alcanzar resultados, por debajo de 90 mg/L, durante la evaluación del filtro.

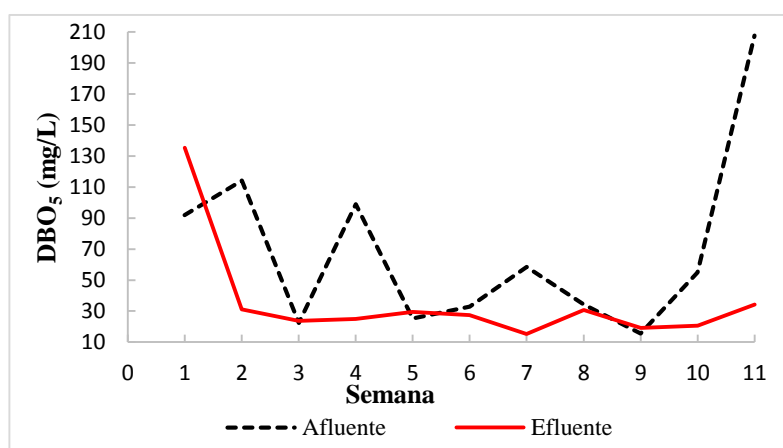


Figura 4. Comportamiento de la DBO₅ en el FAFA con Tapas.

El comportamiento de la DQO de entrada, tiene variaciones entre 150 y 620 mg/L, debido a que las aguas residuales domésticas, en general, muestran variaciones de caudal y principalmente en la carga contaminante, a causa de la fluctuación en las actividades y en el número de habitantes presentes durante la jornada (Carrhá *et al.*, 2006).

Por consiguiente, se generaron valores de pH por fuera de los rangos recomendables en el filtro (6,5-8,0), lo cual puede ser un indicador de inestabilidad en el FAFA. Una alta concentración de pH puede revelar un tratamiento desequilibrado como lo afirma McCarty (1964), es decir, se generó un desequilibrio o alteración en el comportamiento del filtro, lo cual ocasionó variación en los valores de DQO en las últimas semanas, como se muestra en la figura 5.

Por otro lado, a pesar de esta variación, durante las ocho semanas anteriores, el efluente mostró valores estables, lo que indica un funcionamiento adecuado del sistema durante este periodo de tiempo, acorde con la investigación realizada por Caicedo (2006).

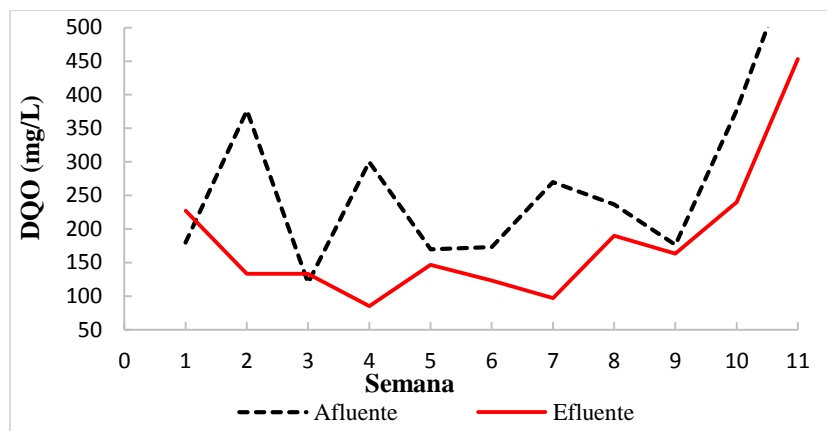


Figura 5. Comportamiento de la DQO en el FFAFA con Tapas.

FAFA con Vasos. En la figura 6, se aprecia que, a partir de la segunda semana, los valores de DBO₅ en el efluente, se mantuvieron constantes y garantizó valores por debajo de 40 mg/L. Esto posiblemente, a causa de que el medio filtrante utilizado, propició la formación de la biopelícula, ya que éste material es altamente poroso, por lo tanto, generó zonas más grandes disponibles para la acumulación de bacterias, lo cual aumentó la remoción de materia orgánica (Sperling y Chernicharo, 2005).

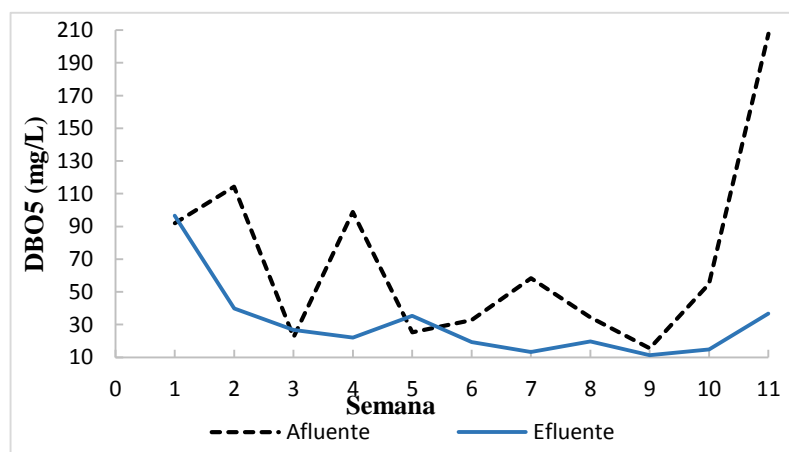


Figura 6. Comportamiento de la DBO₅ en el FFAFA con Vasos.

El comportamiento en los valores de DQO en la figura 7, es muy similar a la gráfica anterior, muestra valores constantes y por debajo del valor máximo permisible. Esto indica un óptimo funcionamiento del filtro, y demostró que la modificación aplicada a los vasos fue un factor influyente en la formación de la biopelícula, dado que el área superficial del vaso, permitió

una mayor fijación de bacterias, lo cual comprueba que el medio filtrante favorece la remoción de DQO. Igualmente se obtuvo valores variables acorde con la investigación realizada por Parra (2006), quien utilizó el mismo medio filtrante.

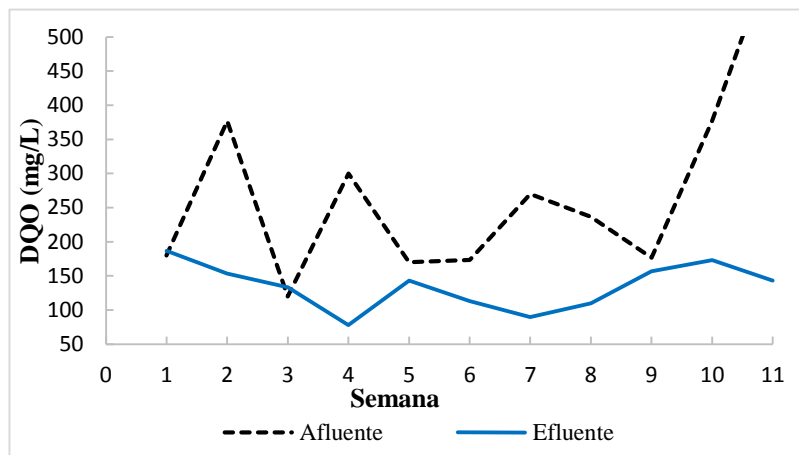


Figura 7. Comportamiento de la DQO en el FAFA con Vasos.

Remoción de DBO₅. En la Tabla 3, se puede comprobar que los porcentajes de remoción de DBO₅ son muy variables, esto depende en gran parte de la etapa de estabilización que necesitan los filtros para funcionar adecuadamente y empezar a remover la carga contaminante.

Tabla 3. Porcentajes de Remoción de DBO₅ en los tres FAFA.

Semana	% Remoción de DBO ₅		
	FAFA con Escombros	FAFA con Tapas	FAFA con Vasos
1	0	0	0
2	71,83	72,82	65,10
3	30,72	0	0
4	78,01	74,76	77,58
5	20,71	0	0
6	44,43	16,22	41,20
7	61,27	73,78	77,40
8	26,74	10,47	42,73
9	12,90	0	26,45
10	36,79	62,30	72,86
11	90,47	83,49	82,33
Promedio	43,08	35,8	44,15

En la semana 5 se evidencian las remociones más bajas, esto debido a que la carga contaminante del afluente se encontraba por debajo de 30 mg/L, es decir, las fuertes variaciones en el flujo y la concentración, pueden afectar negativamente la eficiencia de un reactor anaeróbico. Por lo tanto, la eficiencia de remoción del filtro depende del tiempo de retención hidráulica aplicada (TRH), la intensidad y la duración de las variaciones, las características y el diseño del reactor (Carrhá *et al.* 2006).

A pesar de esto, cuando la carga contaminante era alta, se logró obtener altos porcentajes de remoción en los filtros anaerobios alcanzando hasta 90,47% para Escombros, 83,49% para Tapas y 82,33% para Vasos, acorde con resultados expuestos por Parra (2006), quien utilizó vasos como medio filtrante, Castaño y Paredes (2002) utilizaron grava, y Maldonado y Ramón (2006) utilizaron ladrillo triturado de arcilla. También se debe agregar, que los medios filtrantes utilizados para los tres filtros, garantizaron obtener valores de DBO₅ por debajo de los máximos permisibles (90 mg/L), cumpliendo lo establecido en la norma Resolución 0631 (MINAMBIENTE, 2015).

Remoción de DQO. A partir de la cuarta semana, hubo una permanente remoción, como se muestra en la Tabla 4. Cuando la carga de DQO era alta, se removió hasta 80,22% con Escombros, 71,53% con Tapas y 77,01% con Vasos. La remoción de DQO fue más estable en comparación con la de DBO₅, sin embargo, muestra valores que varían entre 20 y 80% de remoción de DQO, acorde con los resultados expuestos por Villanueva *et al.* (2012), quien trabajo con grava como medio filtrante. Para Tchobanoglous, (2004) este tipo de tratamientos, requieren altas cargas de DQO (>12 kgDQO/m³), para garantizar la remoción por encima de 90%.

Por otra parte, se presentan bajas remociones en algunas semanas ocasionadas posiblemente a la baja carga contaminante de entrada. A pesar de esto, los porcentajes de remoción garantizan valores de DQO inferiores a los máximos permisibles, establecidos en la Resolución 0631, (MINAMBIENTE, 2015).

Tabla 4. Porcentajes de Remoción de DQO en los tres FAFA.

Semana	% Remoción de DQO		
	FAFA con Escombros	FAFA con Tapas	FAFA con Vasos
1	9,44	0	0
2	62,84	64,61	59,30
3	36,06	0	0
4	79,53	71,53	73,98
5	31,35	13,71	15,71
6	38,43	28,85	34,62
7	58,15	64,07	66,67
8	36,63	19,73	53,53
9	22,64	7,58	11,32
10	35,41	36,29	54,00
11	80,22	27,27	77,01
Promedio	44,61	30,33	40,56

CONCLUSIONES

La caracterización del agua residual indicó que los valores de DBO₅ y DQO se encuentran por encima de los límites máximos permisibles establecidos por la norma. Además, la relación DQO/DBO₅ permitió observar, que el tratamiento biológico puede ser viable. Y finalmente esta caracterización fue de vital importancia para determinar los caudales de diseño y las dimensiones de los FAFA.

El material filtrante reciclable, es de fácil recolección debido a que éste tipo de residuos se genera a diario en la Universidad de Nariño. Asimismo, estos subproductos demostraron que tienen características que favorecieron la fijación de bacterias, para la formación de la biopelícula. Finalmente, el proceso de inoculación del medio soporte fue exitoso, debido a que las bacterias consiguieron aclimatarse a temperaturas inferiores a 20 °C y se logró formar la biopelícula.

La toma de muestra durante el horario establecido, no garantizó homogeneidad en la carga contaminante del agua residual, la variabilidad continuaba, probablemente debido a fluctuaciones en las actividades que se realicen y en la población universitaria presente durante la jornada.

La variabilidad en la carga contaminante del agua residual, interfiere de manera directa en el funcionamiento de los filtros, cuando se inyectan altos o bajos niveles de concentración. A pesar de esto, los FAFA continúan removiendo materia orgánica, sin embargo, esta variabilidad genera bajos porcentajes de remoción a consecuencia de la baja carga contaminante en el afluente.

A pesar de las limitaciones con relación al diseño, construcción, operación, mantenimiento y funcionamiento, los FAFA, después de estabilizarse, funcionaron correctamente, lograron remover DBO₅ y DQO y alcanzaron altas eficiencias, lo cual garantizó que el agua tratada cumpla con los valores límites máximos permisibles en los vertimientos.

RECOMENDACIONES

Para realizar una adecuada toma de muestras, es necesario tener en cuenta los procedimientos recomendados por la norma NTC-ISO 5667-2, y así garantizar la integridad de la muestra y obtener resultados confiables.

Es imprescindible tener en cuenta los parámetros y criterios de diseño para la construcción de un FAFA, con el propósito de evitar inconvenientes y obtener altas eficiencias de remoción de carga contaminante.

Para garantizar una mayor eficiencia en el filtro, es necesario contar con un tanque de almacenamiento que permita la homogenización del agua residual. Además, cuando el efluente aun presenta altas cargas, se recomienda recircular el agua tratada.

La implementación del proyecto en la universidad de Nariño, es factible ya que requiere baja inversión, contribuye al manejo de subproductos de otros procesos, y garantiza el cumplimiento de la normatividad colombiana, en cuanto a niveles máximos permisibles en vertimientos a cuerpos de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, F. J. (2013). Propiedades Físicas: Densidad Y Porosidad. Departamento de Geología, Petrología y Geoquímica. Universidad de Oviedo. España. 5 p. En: https://www.researchgate.net/publication/237009661_PROPIEDADES_FISICAS_DENSIDAD_Y_POROSIDAD. Consultado: 15/09/2015

BABBITT, H. E. Y BAUMANN, E. R. (1998). Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras. Editorial Continental, S. A. ciudad de México. México.

BATERO, Y. C. Y CRUZ, E. M. (2007). Evaluación de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente con Medio de Soporte en Guadua Para la Remoción de Materia Orgánica de un Agua Residual Sintética. Trabajo de Grado, Tecnólogo en Química. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 71 p.

CAICEDO, F. J. (2006). Diseño, Construcción y Arranque de un Reactor U.A.S.B. Piloto Para el Tratamiento de Lixiviados. Trabajo de Grado, Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Colombia. 41 p.

CARRHÁ, R. L., VAN HAANDEL, A. C., ZEEMAN, A. Y LETTINGA, G. (2006). The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. *Bioresource Technology Journal*. Brasil. 1105–1118 p.

CASTAÑO, J. M. (2003). Influencia del Medio de Soporte en el Comportamiento de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente Bajo Diferentes Tiempos de Retención Hidráulica. Trabajo de Grado, Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.

CASTAÑO, J. M., Y PAREDES, D. (2002). Usos de Aros de Guadua en Filtro Anaerobio Para el Tratamiento de Aguas Residuales. En *Avances en la Investigación sobre Guadua*. Simposio Taller llevado a cabo en Pereira, Colombia. 6 p.

CRITES, R. Y TCHOBANOGLOUS, G. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Editorial, Mc Graw Hill. Colombia. 776 p.

ECHEVARRÍA, L. (2013). Técnicas y métodos de uso de las biopelículas en la búsqueda de procesos de biorremediación. *Scientific International Journal*. Ponce, Puerto Rico. 10: 32- 43

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (1995). Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-2. Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Muestreo. Técnicas Generales de Muestreo. Bogotá D.C. Colombia. 15 p.

IDEAM. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (2015). Laboratorios acreditados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, bajo los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025. Colombia. 35 p.

LETTINGA, G., HULSHOF, L. W. Y ZEEMAN, G. (1996). Biological Wastewater treatment. Part I: Anaerobic Wastewater treatment. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, ed. Países Bajos.

MALDONADO, J. I. Y RAMÓN J. A. (2006). Sistema de Tratamiento para Aguas Residuales Industriales en Mataderos. *Revista ambiental agua, aire y suelo*. Pamplona, Norte de Santander, Colombia. 1:34-47 p.

McCARTY, P. L. (1964). Associate Professor of Sanitary Engineering. Stanford University. United States. 66 p.

MINAMBIENTE. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2015). Resolución 0631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado. Bogotá, Colombia. 62 p. En: http://corponor.gov.co/control_calidad/RESOLUCION%20MINAMBIENTE%20NACIONAL%20631%20DE%202015.pdf

MinDesarrollo. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá D.C., Colombia. 145 p.

PARRA, L. M. (2006). Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Colombia. 40 p.

PARRADO, C. (2012). Manual de manejo de residuos de construcción y demolición para obras en Bogotá. En Secretaría Distrital de Ambiente (Presidencia), Programa Basura Cero – Escombros Cero. Simposio llevado a cabo en el I Foro Internacional para la Gestión y Control de los Residuos de la Construcción y Demolición, Bogotá, Colombia.

ROMERO, J. A. (1999). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia. 1248 p.

SPERLING, M. V. Y CHERNICHARO, C. A. L. (2005). Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. Department of Sanitary and Environmental Engineering Federal University of Minas Gerais, Brazil. 836 p.

SPERLING, M. V. (2012). Principios del tratamiento biológico de aguas residuales. Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Volumen 1. Primera edición en español. Minas Gerais, Brasil. 468 p.

SUAREZ, C. L. (2006). Tratamiento De Aguas Residuales Municipales en el Valle Del Cauca. Trabajo de Grado. Maestría en Ingeniería Sanitaria Y Ambiental. Universidad del Valle. Cali. Colombia. 111 p.

TCHOBANOGLOUS, G. (2004). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition. Metcalf and Eddy Inc. McGraw-Hill. New York. United States. 1823 p.

VILLANUEVA, J. A., GÓMEZ, J. M., VÁZQUEZ, R. A., NÁJERA, H. A., ROBLERO, N. Y HERNÁNDEZ, E. (2012). Evaluación de la Remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en Dos Biofiltros con Diferentes Empaques. Lacandonia. México. 6:8 p.

YOUNG, J. C. (1991). Factors Affecting the Design and Performance of Upflow Anaerobic Filters. Water Science and Technology. 24:133-155 p.