

# EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOFILTROS DE BAJO COSTO EN LAS INSTALACIONES DEL CAMPUS GUSTAVO GALINDO DE LA ESPOL

Flores Ordóñez Genoveva <sup>(1)</sup>; Torres Andrade Francisco <sup>(2)</sup>  
Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
genaflor@espol.edu.ec; ftorres@espol.edu.ec

## Resumen

La evaluación de la factibilidad técnica y económica para la implementación de un sistema de biofiltros de bajo costo como una alternativa económica para el tratamiento de las aguas servidas, se utilizó empleando múltiples capas de lechos filtrantes cuya finalidad es la de reducir la carga orgánica y otros contaminantes. Se diseñó, construyó y se comenzó las operaciones del sistema consistente fundamentalmente en filtros de flujo horizontal y vertical de grava en paralelo. Los resultados del muestreo rutinario llevado a cabo durante 10 días han demostrado que esta tecnología tiene la capacidad de reducir la materia orgánica hasta un 60 y 90% respectivamente, esta técnica ha quedado demostrada como una apropiada para ser utilizada por diversas comunidades pequeñas.

**Palabras Claves:** *biofiltro, lechos filtrantes, materia orgánica, carga orgánica, aguas servidas, flujo horizontal, flujo vertical.*

## Abstract

*The evaluation of the technical and economic feasibility for the implementation of a system of low-cost biofilters as an economic alternative for the treatment of wastewater, we used multiple layers using filter beds which aims to reduce the organic load and other contaminants. Was designed, built and began operations the system filters consisting mainly of horizontal and vertical flow of gravel in parallel. The results of the sampling routine conducted for 10 days have shown that this technology has the ability to reduce the organic matter 60 and 90% respectively, this technique has been demonstrated as suitable for use by several small communities.*

**Keywords:** *biofilter, leach fields, organic matter, organic load, sewage, horizontal flow, vertical flow.*

## 1. Introducción

En Ecuador, como en muchos otros países, una gran cantidad de residuos contaminantes en las aguas servidas domésticas son descargados directamente en ríos y esteros de las ciudades a diario, provocando un alto impacto medio ambiental, factor que también perjudica la salud de los habitantes del poblado donde se originan las aguas residuales y las localidades aguas abajo. Esta contaminación se agrava aún más en poblaciones con mayor número de habitantes, algunas de las cuales poseen sistemas de tratamientos de aguas residuales que sobrepasan su capacidad máxima de diseño.

El subsector de agua potable y saneamiento evidencia en la actualidad a nivel nacional un rezago importante respecto al promedio sudamericano, en particular en el sistema de alcantarillado y el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. La ciudad de Guayaquil

actualmente no cuenta con la suficiente infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales proveniente de las actividades domésticas de la ciudad, siendo estos vertidos descargados de manera significativa en los cuerpos receptores más cercanos a una vivienda, una industria, un establecimiento educativo y afines, los cuales aportan de manera elocuente con niveles de carga orgánica y algunos contaminantes que muy difícilmente pueden biodegradarse en el ecosistema.

La carga contaminante de las aguas servidas se compone fundamentalmente de materia orgánica solubilizada, en estado coloidal y en suspensión. Los municipios requieren un tratamiento primario y secundario previo a las descargas directas. El tratamiento primario comprende elementos, tales como: desbastadores, desarenadores o cámaras de remoción de cascajos, y estanques para sedimentación primaria. El tratamiento secundario, por lo general, lo componen tratamientos con químicos coagulantes/floculantes, tratamiento

biológico y sedimentación secundaria [1]. Sin embargo, estos procesos resultan muy costosos debido a la gran cantidad de insumos químicos y de energía para el tratamiento de las aguas.

El tratamiento de las aguas residuales mediante el uso de filtros biológicos ha sido un proceso alternativo estudiado y utilizado en otros países como España para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en pequeñas comunidades como un medio alternativo de bajo costo y de fácil operación. Dadas las condiciones actuales limitantes sobre el consumo y uso del agua es importante implementar un sistema de tratamiento de bajo costo que permita tratar el agua antes de verterlos al cauce más cercano, y en medida de lo posible, considerar la alternativa de reutilizarla en actividades como el riego de plantas ornamentales y uso en inodoros.

La tecnología escogida consistió en cuatro filtros que operan independientemente uno del otro y que a su vez incorpora la filtración en múltiples etapas. Se trata de dos filtros de grava horizontales, de flujo ascendente y descendente respectivamente, y dos verticales de flujo descendente y descendente/ascendente respectivamente. El propósito fundamental ha sido demostrar la capacidad y confiabilidad de los filtros en mención para producir un efluente de calidad bajo todo tipo de condiciones operacionales, incluyendo eventos extremos de turbiedad y el uso de las características propias de determinadas bacterias en sistemas de filtración [2].

## 2. Materiales y métodos

Una vez que el agua residual ha sido tratada y de acuerdo al uso que se le quiera dar, deberá cumplir unos parámetros mínimos de calidad, tanto microbiológicos como físico-químicos. El uso de microorganismos como indicadores, se hace cada vez más necesario para mejorar el control de la calidad de las aguas residuales para evitar enfermedades procedentes de patógenos y para examinar la salud del medio donde se vierte el agua [3,4].

### 2.1. Reactivos y disoluciones utilizadas

#### 2.1.1. Sustratos

Se hicieron experimentos empleando aguas residuales domésticas del Campus Gustavo Galindo de la Espol. El volumen de agua que se genera en el Campus varía entre 100 -150 L/hab./día.

#### 2.1.2. Reactivos empleados en los análisis de SST, DQO, DBO<sub>5</sub> y Coliformes Fecales

#### 2.1.2.1. Sólidos suspendidos totales

Durante el proceso de análisis de los sólidos en suspensión se utilizará agua destilada, cuya conductividad sea  $\leq 10 \mu\text{S/cm}$  y Filtros de fibra de vidrio 934-AHTM, diámetro = 4,7 mm, con una porosidad de 1,5  $\mu\text{m}$ .

#### 2.1.2.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En el análisis se utilizó tubos de digestión HACH para DQO en el rango de 0-1500 ppm o reactivos marca Merck solución A + B de igual concentración.

#### 2.1.2.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la biodegradación de la materia orgánica de las aguas residuales industriales se empleó:

- Semilla inoculadora: polyseed
- Solución de cloruro de calcio
- Solución de sulfato de magnesio heptahidratado
- Solución de cloruro férrico heptahidratado
- Solución tampón de fosfato
- Soluciones ácida y alcalina, 1 N, para neutralización de muestras caústicas y ácidas

#### 2.1.2.4. Coliformes Fecales

Medio de cultivo M-FC Rosalic Acid para determinación de Coliformes Fecales, ampollas, plásticas de 2 ml, estériles.

## 2.2. Técnicas analíticas

Las técnicas analíticas utilizadas para el análisis de las muestras de agua obtenidas antes y después del uso de los biofiltros se indican en la tabla 1 [5].

**Tabla 1.** Métodos analíticos empleados para el desarrollo del análisis de las muestras

Parámetro	Método de Análisis
DQO	EPA 410.4
DBO <sub>5</sub>	SM 5210 B
SST	EPA 160.2
Coliformes fecales	SM 9222 D

## 2.3. Parte experimental

### 2.3.1. Descripción de los equipos y biofiltros

Para la descontaminación de aguas servidas por carga orgánica y coliformes se ha empleado la filtración en múltiples etapas cuyo proceso consiste

en la combinación de unidades de pretratamiento con filtración en grava y unidades de tratamiento con filtración en grava con la finalidad de obtener un efluente de calidad sin necesidad de recurrir a reactivos químicos durante el proceso. Adicionalmente, en cada filtro se coloca arena, esta cama de materia orgánica se caracteriza por tener una alta porosidad y poseer propiedades de adsorción y absorción [6].

- **Tanque Pulmón**

El sistema está compuesto de un tanque de PVC de 0.90 m de altura y 0.60 m de diámetro adaptado a una bomba estacionaria de ½ HP, cuenta con un sensor tipo radar de 120 V conectado a una botonera para marcha instalada en un tablero eléctrico con su respectivo breaker. La cisterna abastece al tanque pulmón empleando la bomba. Esta dispone de un sistema automatizado que regula el nivel de agua en el reservorio, a su vez el tanque pulmón ubicado sobre el nivel de los biofiltros los alimenta mediante gravedad.

- **Biofiltro 1 de flujo vertical / descendente**

Es un filtro dinámico que contiene una capa de grava fina, sobre un lecho de grava semigruesa y este a su vez sobre una cama de grava gruesa (espesor<sub>capas</sub>= 0,20 m) y un sistema de drenaje en el fondo. Se compone por un rociador de polipropileno el cual provee del agua a tratar al filtro, controlando el flujo mediante una válvula. El agua a suministrarse proviene del tanque reservorio y fluye a través de un conducto. El afluente traspasa las tres capas de grava llegando hasta un canal por donde el agua filtrada es evacuada. Con el objeto de controlar el flujo de salida el sistema cuenta con otra válvula ubicada a 0.05 m de la superficie en la que se encuentra ubicado el biofiltro. Sobre las capas de arena se coloca una capa de restos de madera (biomasa) formando una capa de entre 10 y 15 cm de espesor, a través de la cual pasa el efluente antes de filtrarse a través de la arena o grava.



**Figura 1.** Biofiltro # 1

- **Biofiltro 2 de flujo Vertical / Ascendente**

Este filtro incorpora el pretratamiento con filtración en grava y la filtración lenta en arena, al igual que el biofiltro 1 se compone de un rociador de polipropileno el cual provee del agua a tratar al filtro. El flujo de entrada es regulado mediante una válvula, para este caso se tiene un sistema de tuberías, ubicado en el fondo de la estructura, permite distribuir el flujo de agua en forma uniforme dentro del filtro. El sistema está constituido por una tubería de 0.4 m de diámetro en cuyo interior se encuentra otra tubería de aproximadamente 0.15 m de diámetro por el cual ingresa el afluente. Entre el espacio anular de las tuberías se observa una capa de arena (espesor<sub>capa arena</sub>= 0,15 m) sobre una capa de grava fina y esta se encuentra sobre un lecho de grava semigruesa y este a su vez sobre una cama de grava gruesa (espesor<sub>capas grava</sub>= 0,20 m).

En la parte inferior de la tubería central se hallan orificios de 0.01 m por donde el efluente es conducido para luego atravesar por rebose las cuatro capas que componen el sistema. A 0.80 m de la base se encuentra el ducto por donde el fluido una vez filtrado es evacuado. Y al igual que en el caso anterior, el fluido circula mediante una capa de restos de madera (biomasa) luego de atravesar por el lecho de arena y grava.



**Figura 2.** Biofiltro # 2

- **Biofiltro 3 de flujo Horizontal / Descendente**

El sistema está constituido por un contenedor (0.60 x 0.30 x 0.40 m) al cual se adapta un rociador que abastece de agua cruda al biofiltro 3. Contiene una cubierta de corteza de madera como medio filtrante sobre una capa de grava fina, hasta revestir a un lecho de grava semigruesa y este colocado sobre una cama de grava gruesa (espesor<sub>capas</sub>= 0,08 m) que constituye el soporte de la grava semigruesa, a su vez se encuentra sobre un sistema de tuberías perforadas que recolectan el agua filtrada.

A 0.05 m de la base se encuentra el ducto de salida por donde se descarga el agua ya tratada, que se abrirá una vez que el contenedor haya alcanzado el nivel de agua requerido.



Figura 3. Biofiltro # 3

- **Biofiltro 4 (tipo horizontal / descendente y ascendente)**

Al igual que el biofiltro 3, el sistema está constituido por un contenedor (0.60 x 0.30 x 0.40 m) al cual se adapta un rociador que abastece de agua cruda al biofiltro 3. Contiene una capa de grava fina de aproximadamente 2 mm por partícula, sobre un lecho de grava semigruesa y este colocado sobre una cama de grava gruesa (espesor<sub>capas</sub> = 0,08 m) constituyendo el soporte de la grava semigruesa, a su vez se encuentra sobre un sistema de tuberías perforadas que recolectan el agua filtrada. Sobre la grava fina se coloca un lecho de madera en trozos.

A 0.05 m de la base se encuentra la salida por la cual el fluido se descarga hasta llegar a otro contenedor con las mismas características. El producto filtrado por segunda vez es finalmente despedido luego de pasar por una capa de materia orgánica colocada sobre la arena.



Figura 4. Biofiltro # 4

Cuando los biofiltros 1, 2, 3 y 4 se encuentra en operación, el caudal generalmente es de 70 – 80 l/día aproximadamente.

Todos los biofiltros son alimentados a través del tanque pulmón, el cual cumple la función de cisterna de almacenamiento de las aguas servidas

previo a su alimentación a los biofiltros, como medio de regulación o control de flujo de alimentación en cada uno de ellos.

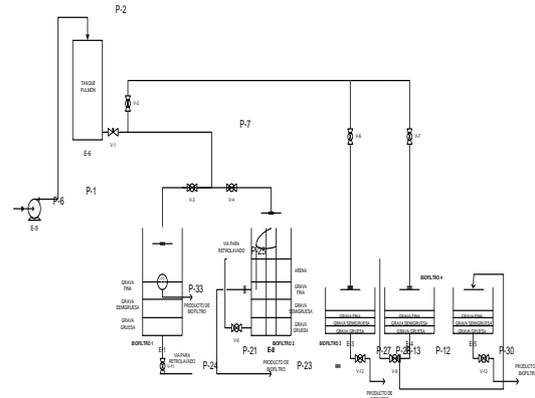


Figura 5. Diagrama de distribución de los biofiltros



Figura 6. Distribución de los biofiltros in situ

### 2.3.2. Procedimiento para obtención de los tiempos de retención

La evaluación hidráulica de un reactor consiste en el seguimiento de un trazador mientras lo recorre, con el fin de determinar el tiempo de retención hidráulica (tiempo que permanece un elemento del fluido en el interior del reactor), el tipo de flujo predominante (pistón, completamente mezclado o no ideal), la presencia de zonas muertas (volúmenes del reactor en que la velocidad del flujo se aproxima a cero y el tiempo de retención hidráulica tiende a infinito), de cortos circuitos (volúmenes del reactor en que la velocidad del flujo tiende a infinito y el tiempo de retención hidráulica tiende a cero) y de recirculaciones (volúmenes de fluido que permanecen dentro del sistema un tiempo superior al tiempo de residencia) [7].

Para determinar los tiempos de retención hidráulica de cada biofiltro se recurrió al análisis de la conductividad eléctrica en la entrada y salida de los filtros utilizando como trazador una solución de cloruro de sodio al 0,1%.

Inicialmente se procedió a suministrar el trazador en cada uno de los biofiltros con un caudal de 60 L/día. Se tomó cada hora valores de conductividad eléctrica tanto en la entrada como en la salida hasta obtener valores de estabilización en cada uno de los biofiltros. El valor final de estabilización se anotó en una bitácora. El proceso se repitió durante una semana.

Con el fin de determinar mejores tiempos de retención hidráulica, se realizó la misma prueba variando el caudal a 80 L/día, 100 L/día y 120 L/día. Estos valores fueron determinados considerando el volumen per cápita de aguas servidas domésticas que se descarga a un sistema o a un cuerpo receptor, de acuerdo a los niveles socioeconómicos bajos a medios y jornadas de no más de 12 horas como sería el caso de los individuos que permanecen en el interior de las instalaciones de la ESPOL.

### 3. Resultados

#### 3.1. Tiempo de retención

Para poder evaluar la eficiencia de los biofiltros en este trabajo investigativo, fue necesario determinar los tiempos de retención hidráulica de cada uno de los biofiltros construidos; dicho proceso que se llevó a cabo in situ con la ayuda de un conductímetro de campo.

Los resultados obtenidos mostraron una notable variación de los tiempos de retención hidráulico entre cada biofiltro. En la Figura 7 se puede apreciar el resultado final obtenido de las mediciones efectuadas en campo, en las que se consideran las variaciones de caudal de alimentación en cada uno de los biofiltros.

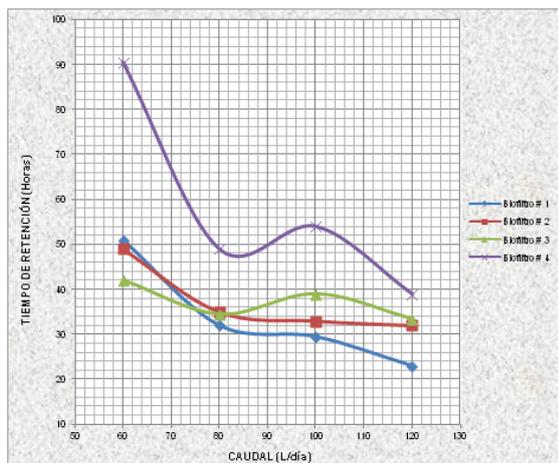


Figura 7. Resultados de los tiempos de retención hidráulica de los biofiltros

### 3.2. Evaluación técnica

Una vez que las aguas residuales han sido procesadas en los biofiltros, se realiza la caracterización de las mismas mediante análisis físico-químicos y microbiológicos. Los resultados reportados se comparan con los análisis realizados al agua servida sin tratar (agua cruda).

Tabla 2. Características del afluente (Agua cruda proveniente de la Cisterna)

Parámetro	Unidad	Resultado
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	1674
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	1139
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	624
Coliformes Fecales	UFC/100 ml	2,49x10 <sup>7</sup>

El porcentaje de remoción que se obtuvo en cada uno de las 4 biofiltros para los parámetros: SST, DQO, DBO<sub>5</sub> y Coliformes fecales, en un período de 10 días, se muestran en las figuras 8, 9, 10 y 11.

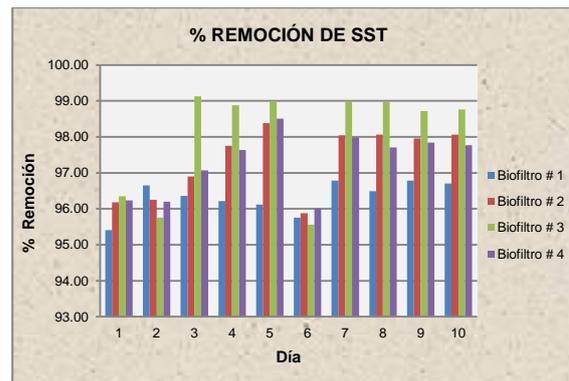


Figura 8. Evaluación de los porcentajes de remoción de SST empleando los biofiltros 1, 2, 3 y 4

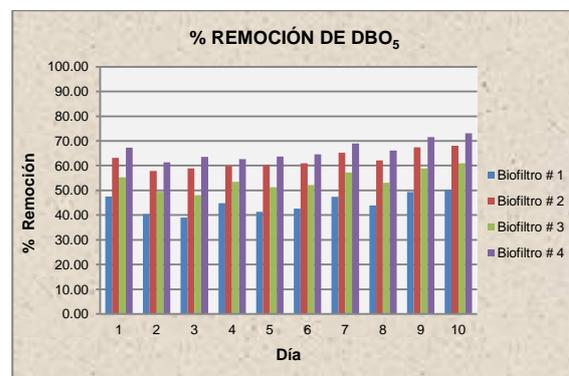
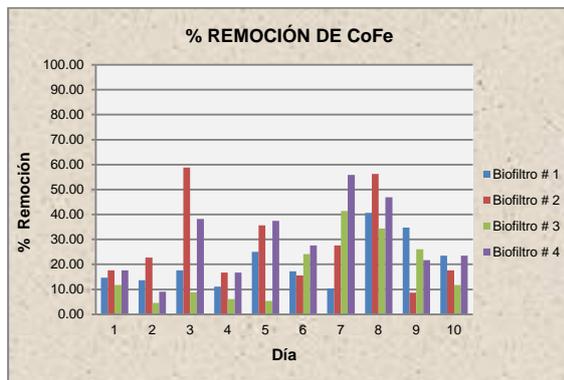


Figura 9. Evaluación de los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> empleando los biofiltros 1, 2, 3 y 4



**Figura 10.** Evaluación de los porcentajes de remoción de DQO empleando los biofiltros 1, 2, 3 y 4



**Figura 11.** Evaluación de los porcentajes de remoción de Coliformes Fecales empleando los biofiltros 1, 2, 3 y 4

### 3.3. Selección del biofiltro más eficiente

Una vez realizado el análisis y la interpretación de los resultados, se procedió a seleccionar el biofiltro más eficiente entre los cuatro biofiltros propuestos, utilizando como criterio de selección la evaluación del porcentaje de remoción promedio de los 4 parámetros seleccionados, calificando la remoción como: baja (0 a 40%), media (41 a 75 %) o alta (76 a 100%).

**Tabla 3.** Evaluación de los resultados obtenidos en los biofiltros

	SST	DBO <sub>5</sub>	DQO	CoFe
<b>Biofiltro # 1</b>	ALTA	MEDIA	BAJA	BAJA
<b>Biofiltro # 2</b>	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAJA
<b>Biofiltro # 3</b>	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAJA
<b>Biofiltro # 4</b>	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAJA

Los resultados han mostrado que los biofiltros 3, 4 y 5 han reducido consistentemente los sólidos en suspensión y la materia orgánica contenidas en aguas servidas.

Los resultados de las pruebas de validación muestran que los procesos empleados por los filtros

han reducido de forma consistente la carga orgánica entre 40 – 75%. Esta es evidencia clara que existe una piel o capa desarrollada en la superficie de los biofiltro la cual estaba aumentando la eficiencia de filtración con el tiempo, como era esperado.

Mientras que las reducciones en coliformes fecales logradas por los filtros alcanzan en su punto máximo el 50% de remoción, sin embargo estos valores según los datos de validación han fluctuado, resultados que se deben probablemente a escapes esporádicos de bacterias de los filtros debido a una piel o capa de filtro subdesarrollada o escape de bacterias previamente alojadas en el filtro de arena.

### 3.4. Evaluación económica de los biofiltros

Uno de los factores más importantes en la selección de los sistemas de tratamientos a utilizar para las aguas residuales domésticas e industriales es el costo que implica tanto la construcción como la operación y mantenimiento.

De acuerdo a la situación económica de cada país, la implementación de grandes sistemas de tratamientos para tratar los efluentes resultan muy costosos convirtiéndose en poco accesibles y posibles de implementar. El uso de sistemas de tratamiento de bajo costo son factibles de utilizar siempre y cuando cuente con la eficiencia de remoción de contaminantes que le permita alcanzar los valores máximos establecidos en la Normativa Ambiental Vigente en el Ecuador, de no ser así, sería una inversión que no rendiría los frutos esperados. Sin embargo, estos sistemas de tratamiento deben ser diseñados de acuerdo al volumen a tratar ya que un mal diseño generará una saturación del sistema disminuyendo la eficiencia de los mismos.

Para un biofiltro, los costos de construcción están influenciados por la distancia desde el sitio donde se obtienen los materiales hasta el sitio de la implantación, debido a los costos que podría implicar la logística para transportar los materiales hasta el sitio seleccionado. En la práctica, el costo de implementación de los biofiltros en el Campus de la ESPOL como tema propuesto de la presente tesis de grado fueron los siguientes:

**Tabla 4.** Costos de los biofiltros

BIOFILTRO	# 1	# 2	# 3	# 4
Tanque o caja (biofiltro)	\$ 70.00	\$ 70.00	\$ 12.00	\$ 24.00
Lechos (grava \$1,28 c/25 kg)	\$ 15.36	\$ 20.48	\$ 15.36	\$ 30.72
Tuberías	\$ 20.00	\$ 31.00	\$ 20.00	\$ 28.00
Válvulas	\$ 8.00	\$ 15.00	\$ 8.00	\$ 16.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 113.36</b>	<b>\$ 136.48</b>	<b>\$ 55.36</b>	<b>\$ 98.72</b>

#### 4. Conclusiones

Se ha demostrado que la incorporación de un prefiltro con un filtro lento de arena o filtración en múltiples etapas (biofiltro 2) y la filtración gruesa dinámica (biofiltro 1) transporta valores elevados de sólidos fácilmente sedimentables, generando una rápida clarificación del afluente.

De acuerdo a los resultados se evidenció que el rendimiento de los biofiltros disminuye si estos no son sometidos a un proceso de retrolavado. El biofiltro 2 debido a que es un biofiltro de múltiples etapas reportó un rendimiento alto en comparación con el biofiltro 1, y esto se evidencia al no contar con facilidades de montaje y desmontaje del sistema.

De la evaluación técnica y económica se puede evidenciar que el biofiltro 3 a pesar de presentar una remoción similar a los biofiltros 2 y 4, éste presenta el menor valor de implementación lo cual demuestra que a más de ser técnicamente viable es económicamente rentable.

#### 5. Agradecimientos

A mi director de tesis, el Ing. Francisco Torres Andrade, por su apoyo y direccionamiento para la ejecución de mi tesis de grado. A mi familia y a todos aquellos que me brindaron su apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

#### 6. Referencias

- [1]. WEBER WALTER J. JR. *Physicochemical processes for water quality control*. Editorial Reverté, S.A., 1979.
- [2]. SEOÁNEZ CALVO MARIANO. *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. Editorial Aedos, S.A., 2004.
- [3]. RESTREPO INES, SÁNCHEZ LUIS DARIO, GALVIS ALBERTO, ROJAS JHONNY, SANABRIA IRMA JANETH. *Avances de investigación y desarrollo en agua y saneamiento*. 2007
- [4]. ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. *Calidad del agua*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1ra edición, 2002.
- [5]. AWWA *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th Edition*. 2005.
- [6]. FLOW-GUARD. Filtros de grava y arena verticales.- *manual de instalación y operación*. Fresno, valves & Castings, Inc.
- [7]. O' LEVENSPIEL. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Editorial Reverté S.A. Tercera Edición. 2004.