



## Evaluación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado en la Hacienda Majavita (Socorro, Santander)



Haimar Ariel Vega Serrano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero civil. Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales. Adscrito al Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Universidad Libre Seccional Socorro. Campus Universitario Majavita. inghaimar@gmail.com, Calle 3 No 17B-14, Socorro Santander, 316 619 2557.

Mayo de 2013

### RESUMEN

En la Hacienda Majavita de la Universidad Libre Seccional Socorro se construyeron dos sistemas de filtración en múltiples etapas FiME, en tanques plásticos y el equivalente en concreto cumpliendo especificaciones para evaluar la operación bajo condiciones locales y comparar su eficiencia, los sistemas

**Figura 1.** Sistema FiME Hacienda Majavita



fueron operados y presentaron remociones apropiadas. Las lluvias fuertes generaron deslizamientos en la vertiente de la fuente de abastecimiento y cambiaron las propiedades del agua incrementando la turbiedad colmatando los filtros. El objetivo consistió en evaluar las condiciones de operación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado para establecer las remociones, para ello se diseñaron los componentes adicionales, se instalaron en el sistema, incluyendo una matriz en botellas plásticas en el pre-sedimentador, haciendo seguimiento y monitoreo tomando un total de 15 muestras compuestas durante el periodo comprendido entre febrero de 2011 y septiembre de 2012. Las

características del efluente fueron en turbiedad 3.6 UNT con remoción del 84.6%, el color aparente fue de 11.8 UPC con remoción del 72.8%, coliformes totales 1,600 UFC/100 ml y remoción del 93.7%, en coliformes fecales 62 UFC/100 ml removiendo el 96.5% sin utilizar desinfectantes. El sistema FiME evaluado logró cumplir con el objetivo de mejorar la calidad del agua para los usos que se le están dando en la Hacienda Majavita al reportar valores en los rangos establecidos en la mayoría de los indicadores, siendo necesario algunos cambios para lograr suministrar agua potable y cumplir con la resolución 2115 a cabalidad, convirtiéndose en una alternativa viable para las fincas de la región.

### Palabras clave

Carga superficial, partículas discretas, tasa de filtración, tratamiento biológico, turbiedad.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Gestión Integrada del Recurso hídrico (GIRH) se puede definir como la conservación y uso racional del recurso hídrico y comprende el manejo de agua superficial y subterránea, en sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico, desde una perspectiva multidisciplinaria y centrada en vincular sus disponibilidades con las necesidades y las demandas de la sociedad relacionadas con el agua según El Centro de Investigaciones en Medioambiente y Desarrollo (CIMAD, 2010).

### 1.1 Descripción del problema

Durante las últimas décadas de este siglo, el mundo ha venido observando con inquietud una serie de problemas relacionados con la disposición de desechos líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial. (Rojas, 2002).

Las diversas actividades agrícolas, ganaderas, industriales y recreacionales del ser humano han traído como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales con sustancias químicas y microbiológicas, además del deterioro de sus características estéticas. Para hacer frente a este problema, es necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios, a fin de purificarla o potabilizarla para que pueda ser consumida por los seres humanos (CIMAD, 2010).

Otro factor incidente en la problemática del agua en Colombia es la contaminación. La CGR (1996), estableció seis problemas ambientales importantes en las fuentes de agua, tres de ellos son:

- Alta presencia de sedimentos por deforestación y deterioro de los suelos.
- Alta contaminación originada en aguas residuales domésticas.
- Alta contaminación derivada del uso de plaguicidas.

Las situaciones son corroboradas por el mapa de Índices de Aridez incluido en el Perfil del estado de los recursos naturales y del medio ambiente en Colombia 2001, elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2001).

A nivel mundial, el 80% de las enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales y una tercera parte de las defunciones causadas por éstas se deben al uso y consumo de agua insalubre. El agua y los alimentos contaminados se consideran como los principales vehículos involucrados en la transmisión de bacterias, virus o parásitos. Los microorganismos patógenos que prosperan en los ambientes acuáticos pueden provocar cólera, fiebre tifoidea, disenterías, poliomielitis, hepatitis y salmonelosis, entre otras enfermedades. (Mondaca y Campos, 2005).

Figura 2. Presencia de sedimentos en fuentes hídricas



Las partículas que se encuentran en el agua pueden ser perjudiciales en los sistemas o procesos de tratamiento ya que elevadas turbiedades inhiben los procesos biológicos y se depositan en el medio filtrante causando elevadas pérdidas de carga y deterioro de la calidad del agua efluente de los filtros (OPS, 2005).

### 1.2 Sistema de filtración en múltiples etapas FiME

En la Hacienda Majavita propiedad de la Universidad Libre Seccional Socorro se construyó en el año 2010 un sistema de filtración en múltiples etapas FiME, para comparar las eficiencias en dos tipos de unidades: concreto y tanques plásticos con el fin de establecer una alternativa para el sector rural y poder suministrar agua apta para el consumo; en este caso para el beneficio del café, dos laboratorios y una batería de baños del Campus Universitario (Ardila et al, 2010).

El sistema fue puesto en funcionamiento y cumplió con las expectativas pero las continuas y fuertes lluvias a finales del 2010 generaron deslizamientos en la parte alta de la cuenca modificando las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua, en especial por la presencia de sólidos, colmatando los filtros al superar el límite de turbiedad máxima de operación, (Avendaño et al, 2010).

Los deslizamientos se presentaron en predios que no son propiedad de la Universidad y la quebrada es el lindero entre las dos fincas, la mayor parte de la vertiente pertenece a la otra.

Los sistemas FiME funcionan para turbiedad inferior a 100 UNT y la cantidad de sólidos presentes en el agua por el cambio en las vertientes de la fuente hídrica deslizamientos y erosión conlleva a la colmatación de las unidades de filtración, generando carreras de filtros cortas y mantenimientos permanentes, proceso dispendioso al ser necesario retirar por completo los sustratos del tanque requiriendo tiempo y cantidades de agua considerables que dificultan el suministro continuo (Avendaño et al, 2010).

**Figura 3.** Deslizamiento en la vertiente del arroyo



El tratamiento con el sistema FiME es biológico por esto se restringe el uso de químicos como coagulantes que afectarían al desinfección del agua. El sistema funciona sin un operador de forma continua tan solo una persona que se encarga de mantener regulado el flujo, controlar el caudal de ingreso y hacer el mantenimiento de las unidades cuando es necesario.

### 1.3 Antecedentes

El ingeniero Naranjo Fernández en 2009 desarrolló una investigación con un sistema compacto de Filtración en Múltiples Etapas FiME para el tratamiento de fuentes de abastecimiento superficial, seleccionado bajo aspectos ambientales, sociales, tecnológicos y económicos, para su aplicación en pequeñas comunidades. En el diseño del sistema de potabilización utilizó conceptualmente criterios de producción de entropía, buscando aproximarse a una distribución granulométrica ideal para obtener un sistema compacto, aumentando la eficiencia de tratamiento y disminuyendo el espacio ocupado por los procesos, obteniendo un sistema FiME compuesto de pre-filtración dinámica en grava, pre-filtración ascendente en antracita y filtración lenta en arena convencional.

Las características generales del sistema construido por Naranjo en la Universidad de Antioquia se presentan en la tabla 1. El caudal de operación es 100 ml/s, y el de lavado de los filtros 1.0 l/s.

**Tabla 1.** Características sistema FiME Universidad de Antioquia

Filtro	Diámetro	Velocidad filtración	Espesor lechos
	cm	m/h	cm
<b>FGDi</b>	40	2.8	77
<b>FGA</b>	60	1.25	137
<b>FLA</b>	76	0.8	140

El sistema FiME construido en tanques circulares de fibra de vidrio de 2.5 metros de alto fue evaluado durante tres meses en días consecutivos, obteniendo los resultados con valores de los indicadores cumpliendo con la resolución 2115.

### 1.4 Pregunta problema

¿Cuáles son las condiciones de operación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado?

## 1.5 Justificación

La investigación se realiza con el objeto de suministrar agua en condiciones apropiadas para el sector rural en fincas, viviendas y colegios, donde se cuente con el recurso y sea factible implementar el sistema. El abastecimiento de agua potable a la comunidad rural es una prioridad para evitar la propagación de enfermedades relacionadas con el consumo del líquido.

Ampliar el rango de operación respecto a turbiedad elevando con ello la flexibilidad operacional del FiME puede aportar una solución para acceder al líquido de forma sencilla, de rápida instalación y bajo mantenimiento.

## 1.6 Objetivo general

Evaluar las condiciones de operación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado.

## 1.7 Objetivos específicos

- Determinar las características técnicas del pre-sedimentador con botellas plásticas.
- Establecer el sistema de retro-lavado para los filtros y sus características de operación.
- Identificar las condiciones de operación y eficiencia del sistema de tratamiento.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Localización

El proyecto de investigación se realizó en la Hacienda Majavita propiedad de la Universidad Libre localizada en el Socorro Santander, a una elevación de 1350 m sobre el nivel medio del mar, a una latitud de 7 °N y una longitud de 73 °W. Con una temperatura promedio de 24 °C, precipitaciones 1250 mm por año y una evaporación potencial de 1200 mm.

El desarrollo del proyecto se inició en febrero de 2011, utilizando los antecedentes sobre el sistema de filtración en múltiples etapas y culminó en septiembre de 2012. Incluyendo dos periodos de lluvias y dos de estiaje.

### 2.2 Tipo de investigación

Es un estudio de caso al investigar en condiciones específicas un proceso de tratamiento mediante filtración y servirá para planear posteriores investigaciones más extensas sobre el tema en otros lugares.

La investigación realizada tuvo un enfoque cuantitativo al medir varios indicadores determinantes de la calidad del agua y parámetros de operación de cada unidad del sistema. El alcance fue descriptivo al determinar las características del agua tratada y el comportamiento en la remoción de cada unidad del sistema.

### 2.3 Definición de variables e indicadores

Las variables establecidas a partir de los objetivos son las descritas en la tabla 2, mediante estas se determinara la eficiencia de cada unidad y del sistema para el tratamiento del agua.

Tabla 2. Variables y su clasificación

Tipo	Variable	Unidad
Dependiente	Remoción	%
Independiente	Tiempo de operación	día
	Unidad del sistema	-
Intervinientes	Turbiedad	UNT
	Color aparente	UPC
	Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l
	Coliformes fecales y totales	UFC/100 ml
	Potencial de hidrogeno	Unidad de pH

Los indicadores utilizados para la evaluación de la remoción y calidad del agua en el sistema son los exigidos en la resolución 2115 del 2007.

### 2.4 Técnicas de investigación

La técnica utilizada para la recopilación de la información en la investigación fue el trabajo de campo tomando muestras de agua directamente en el sistema de filtración, la realización de

mediciones de caudal y el cálculo de carga superficial y velocidades de filtración.

También se utilizaron algunos laboratorios como el de Aguas y Microbiología donde se realizó el análisis de las muestras mediante las técnicas establecidas en el *Standard Methods* versión 2005, el laboratorio de Suelos se establecieron las características de los lechos filtrantes y en el laboratorio de Hidráulica se realizaron calibraciones y pruebas piloto.

## 2.5 Análisis estadístico

En la ejecución de la investigación la técnica estadística utilizada fue cuantitativa de tipo muestreo para determinar la remoción de cada una de las unidades del sistema, calculando la media verdadera con el parámetro T. También se hallaron promedios, máximos, mínimos y desviaciones estándar.

## 2.6 Materiales: sistema FiME

El sistema filtración en múltiples etapas FiME con evaluado está constituido por un tanque de llegada, filtro grueso dinámico de flujo descendente, filtro grueso descendente, filtro lento de arena y tanque de almacenamiento.

Los materiales para los lechos filtrantes son los utilizados en la región para la construcción como arena, gravilla y triturado de bolo de río, a continuación se describen el sedimentador y los tres filtros.

### 2.6.1 Sedimentador con matriz en botellas

Inicialmente se utilizó un sedimentador convencional construido en un tanque plástico de 1000 litros para continuar utilizando este tipo de material en el sistema garantizando facilidad para el transporte y la instalación, en el fondo se adecua de forma cónica para acumular los lodos y retirarlos por una tubería de 1.5" localizada en la parte inferior, luego se construyó una matriz en botellas plásticas de 2.5 litros y se colocó dentro del tanque para incrementar la remoción de sólidos por adhesión.

### 2.6.2 Filtro Grueso Dinámico (FGDi)

Es el primer filtro del FiME, fue construido en una caneca de 200 litros, tiene un diámetro promedio de 47 cm y una altura de 96 cm, el flujo de agua es descendente, ingresa por una flauta instalada con una caída de 15 cm para aumentar el oxígeno disuelto mejorando el ambiente para los microorganismos y así prevenir condiciones anaeróbicas en el lecho filtrante (Visscher et al, 1992: 27).

### 2.6.3 Filtro Grueso Ascendente (FGA)

Es el segundo filtro, se caracteriza por tener gravas de diferentes tamaños, fue construido en un tanque de 250 litros marca Acuaviva, con diámetro promedio de 60 cm. El flujo de agua es ascendente, ingresa al tanque por una flauta colocada en la parte inferior y sale por otra flauta en la superficie del agua, cuenta con una válvula para lavado.

### 2.6.4 Filtro Lento de Arena (FLA)

El filtro lento de arena es de flujo descendente, el agua ingresa mediante una flauta elevada para incrementar el oxígeno disuelto, pasa a través de la arena de río tamizada con un anejo con orificios de un milímetro. En la parte inferior tiene una capa de gravilla y una de triturado.

### 2.6.5 Sistema de retro lavado

El sistema de lavado para los filtros está integrado por el sistema de bombeo por medio de la cual se conduce el agua hasta el tanque elevado y la red instalada en cada tanque para conducir el agua a través del lecho filtrante. El diseño se realizó utilizando la metodología propuesta en el libro *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados* de López Cualla 1995. El caudal de operación hacia el tanque elevado es 0.90 l/s requiriéndose aproximadamente 25 minutos para el llenado, proceso realizado mediante el manejo de las válvulas de control localizadas en la succión e impulsión.

## 2.6.6 Parámetros de operación de las unidades del sistema

En la tabla 3 se aprecian los parámetros de operación de cada uno de los componentes del sistema

**Tabla 3.** Parámetros de operación de las unidades

Parámetro	Símbolo	Unidad	Unidad de Filtración			
			Sedimentador	FGDi	FGDe	FLA
Caudal de operación	Q	ml/s	32	32	30	30
Diámetro del tanque	D	cm	100	47	60	75
Altura del lecho	H	cm	60	70	62	55
Área superficial	A	cm <sup>2</sup>	7854	1735	2827	4418
Velocidad de filtración	Vf/Cs	m/h	0.15	0.66	0.38	0.24
Carga hidráulica	CH	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> - d	3.52	15.94	9.17	5.87
Tiempo retención	Trh	h	4.1	1.1	1.6	2.2
Volumen tratado	Vol	m <sup>3</sup>	2.76	2.76	2.59	2.59
Volumen tanque	VolT	litros	1000	200	250	500
Velocidad filtración teórica	Vf/Cs	m/h	0.1 - 0.5	0.5 - 2.0	0.25 - 1.5	0.125 - 0.5

Las velocidades de filtración se encuentran dentro de los rangos establecidos para el sedimentador y los filtros según OPS/CEPIS.

## 2.6.7 Lavado de filtros

El sistema de lavado para los filtros está integrado por el sistema de bombeo por medio de la cual se conduce el agua hasta el tanque elevado y la red instalada en cada tanque para conducir el agua a través del lecho filtrante.

## 2.7 Equipos de medición

Las mediciones de caudal se realizaron mediante aforo volumétrico utilizando una botella aforada de 500 mililitros y un cronómetro.

## 2.8 Procedimiento

El proyecto se ejecutó de acuerdo a cada uno de los objetivos específicos:

En la primera parte se establecieron los parámetros para el diseño del pre-sedimentador a partir del agua de la fuente y se definieron las dimensiones mediante sedimentación de partículas discretas (sedimentación tipo I) adaptándolo en un tanque plástico de 1000 litros. Luego se construyó la unidad y se instaló en el sistema.

Según las características de operación de los filtros y el terreno se diseñó el sistema de retro lavado para luego ser implementado y mediante su utilización se identificaron las condiciones de operación en las unidades FGDi y FGDe.

Se implementaron vertederos de orificio para cada filtro para permitir la medición de caudal sin interrumpir el flujo y hacer la toma de muestras en los monitoreos. Estos fueron calibrados utilizando cinco caudales diferentes en el rango del caudal teórico.

El mantenimiento de las unidades consistía en lavar los lechos filtrantes una vez el agua llegaba al nivel de rebose, la limpieza se hacía retirando la capa superior del lecho y lavándolo para luego ser colocado de nuevo en el respectivo filtro. En el caso del filtro lento se raspaba la capa superior del filtro.

### 2.8.1 Procedimiento en los monitoreos

Los monitoreos fueron realizados mediante el procedimiento establecido para evaluar la eficiencia de cada unidad del sistema

garantizando las condiciones de operación del diseño y consistía en:

1. Verificar el sistema estuviera en operación, ingresando agua y circulando por todas las unidades.
2. Realizar limpieza del control de flujo por colmatación.
3. Regular el caudal de ingreso al sistema.
4. Iniciar la toma de muestras a la entrada del sistema
5. Establecer el caudal de entrada.
6. Continuar con la toma de muestras en cada unidad según los tiempos de retención.
7. Realizar el registro de los caudales en cada unidad.

## 2.9 Población y muestra

Durante el periodo de estudio se realizó el seguimiento al sistema, haciendo la operación y el mantenimiento de las unidades, tomando muestras y realizando el análisis del agua mediante los indicadores turbiedad, color aparente, sólidos suspendidos y microbiológicos una vez al mes para identificar la eficiencia de cada unidad en remoción. En total se tomaron 15 muestras compuestas en el periodo de febrero de 2011 a septiembre de 2012. En cada unidad se media el caudal con cinco aforos volumétricos.

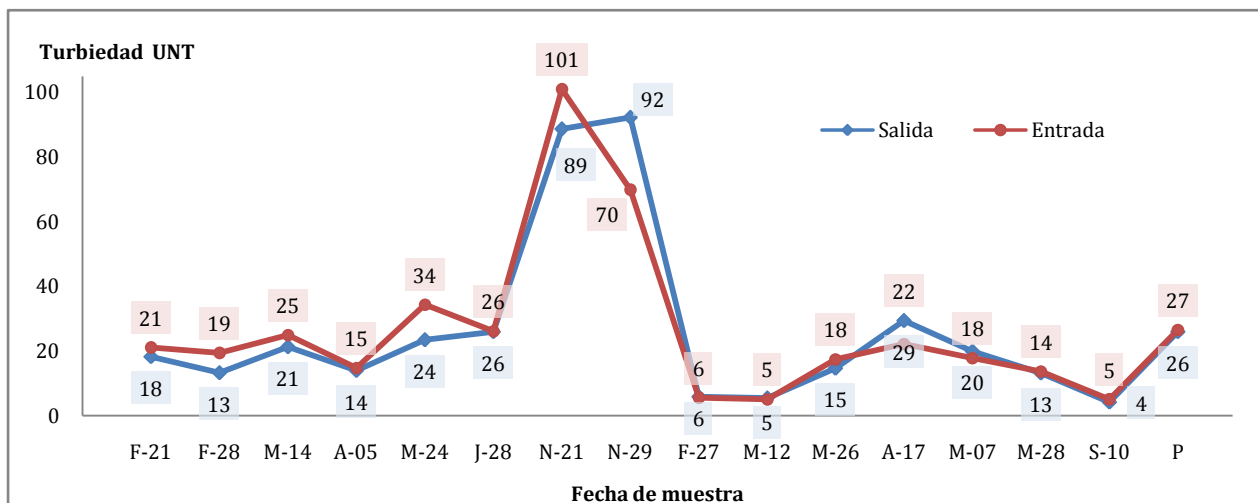
## 3 RESULTADOS

Posterior a realizar el seguimiento al sistema durante un periodo de 20 meses y de hacer los monitoreos con muestras compuestas a cada unidad, se establecieron las remociones en cada uno de los indicadores utilizados para determinar las remociones del sistema permitiendo evaluar la eficiencia del pre-sedimentador y de los tres filtros que conforman el FiME, a continuación se presentan los principales resultados.

### 3.1 Eficiencia del pre-sedimentador con botellas plásticas

La remoción de turbiedad en el pre-sedimentador con matriz en botellas plásticas de 2.5 litros se presenta en la figura 4, donde se aprecia el comportamiento en los 15 días de monitoreo.

Figura 4. Comportamiento de la turbiedad en el pre-sedimentador



La turbiedad de entrada al sedimentador en términos generales es baja, se presentaron dos valores próximos a 100 UNT en noviembre de 2011, para el primer caso se da una disminución cumpliendo con su función, en el segundo caso se incremento pasando de 70 a 92, esto se debe a la cantidad de material presente en las botellas en el momento del monitoreo por las lluvias de estos días sin que se realizara el

mantenimiento requerido. Con los valores bajos de turbiedad se pueden presentar pequeñas remociones o incrementos al tener las botellas material adherido a su superficie previamente.

### 3.2 Eficiencia Filtro Grueso Dinámico FGD<sub>i</sub>

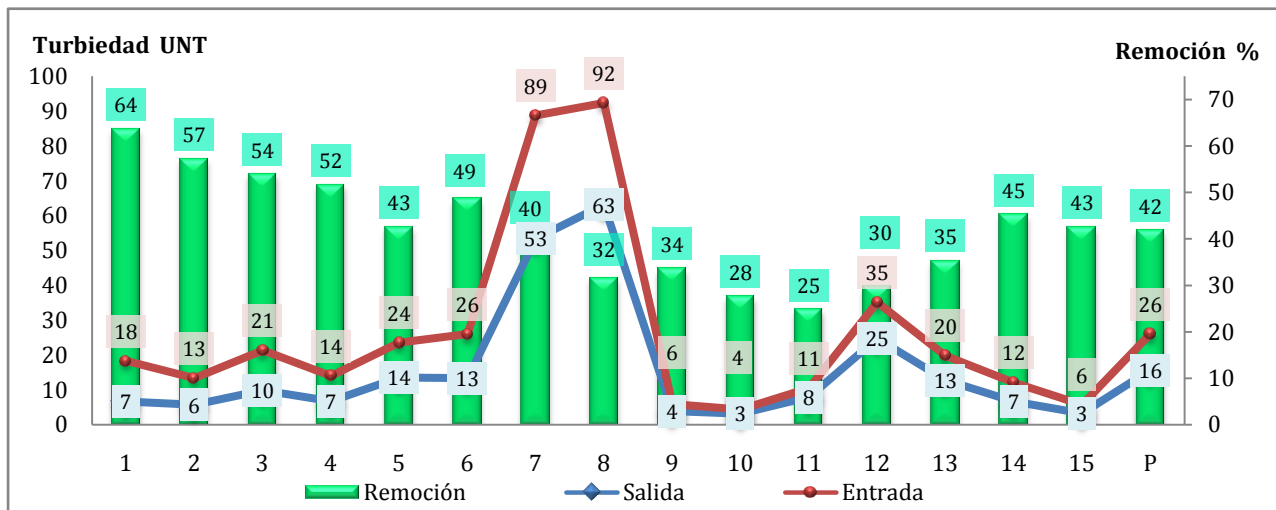
El FGD<sub>i</sub> es la primera unidad del FiME, a continuación se tiene el comportamiento de los indicadores y las respectivas remociones en turbiedad y color aparente.

#### 3.2.1 Remoción de Turbiedad en el FGD<sub>i</sub>

La turbiedad es uno de los indicadores fundamentales que reflejan la eficiencia en la operación del FGD<sub>i</sub> en la figura 5 se aprecia como varió durante el tiempo de evaluación del sistema.

La turbiedad de ingreso al FGD<sub>i</sub> tiene durante los primeros seis meses un comportamiento similar, cambia en noviembre donde aumenta por el incremento en las lluvias y alcanza un valor máximo de 92 UNT disminuyendo hasta 63 en el filtro, removiendo el 32%.

Figura 5. Comportamiento de la remoción de turbiedad en el FGD<sub>i</sub>



La turbiedad de ingreso tiene un promedio de  $26.1 \pm 15.2$  siendo considerable la variación mientras en la salida se regula como lo muestra el rango de la media verdadera con un promedio de  $15.6 \pm 10.1$  garantizando condiciones favorables para la siguiente unidad de filtración.

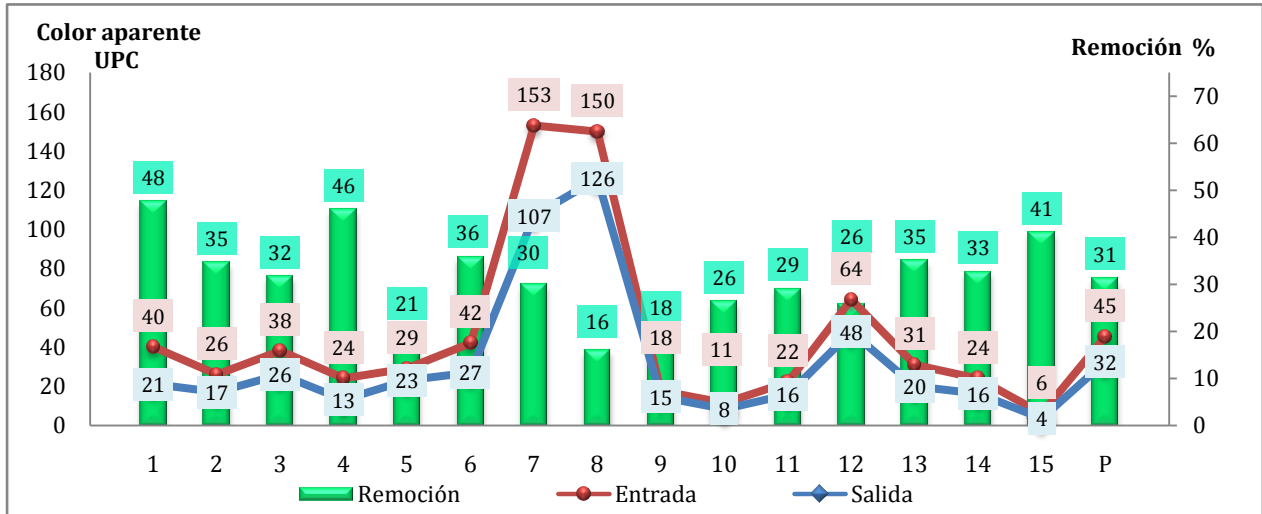
Omitiendo los datos de los días que se permitió que el sistema operara con turbiedades superiores a las admisibles para el diseño (máximo 70 UNT) correspondientes a las muestras 7 y 8, y sin mantenimiento 12 se tiene un promedio en salida de 9.3 con una remoción del 45.3% siendo cercana a la teórica.



### 3.2.2 Remoción de color aparente en el FGD<sub>i</sub>

La remoción de color aparente es utilizada como referencia por ser uno de los indicadores establecidos en la resolución 2115 y sugerida por los autores para hacer seguimiento. En la figura 55 se aprecia el comportamiento de este indicador para las muestras analizadas.

Figura 6. Comportamiento de la remoción del color aparente en el FGD<sub>i</sub>



El comportamiento del color aparente de entrada presenta dos puntos críticos en las muestras 7 y 8 en los que se permitió el ingreso de agua fuera de las condiciones de diseño, con valores de color en 150 durante dos muestras consecutivas tomadas una ocho días después de la otra y sin realizar mantenimiento previo después del primer evento máximo.

Como se observa en la figura 6 para el día 21 de noviembre el filtro remueve el 30% siendo aceptable por la cantidad de ingreso, para la muestra ocho la remoción es mínima por el filtro estar colmatado, afectando el promedio de los datos, exceptuando estos datos, las remociones son próximas al promedio de  $31.3 \pm 5.2$ .

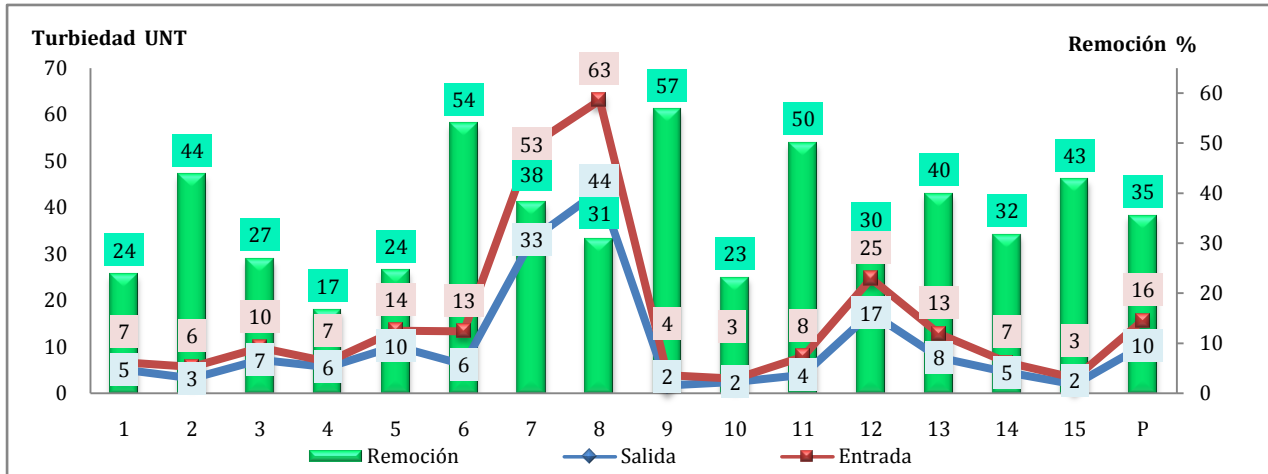
### 3.3 Eficiencia Filtro Grueso Descendente FGDe

El filtro grueso inicialmente opero en flujo ascendente y luego al ser instalado el lavado se cambio a flujo descendente para facilitar el lavado e incrementar el oxígeno disuelto en el agua mediante una caída utilizando una flauta colocada a una altura superior del lecho filtrante.

### 3.3.1 Remoción de turbiedad en el FGDe

La remoción de turbiedad en el filtro respecto a los valores de ingreso al mismo se aprecian en la figura 7 para las 15 muestras tomadas, presenta una variación considerable a lo largo del periodo de evaluación, con un rango desde 17% hasta 57% con un promedio de  $35.4 \pm 7\%$ .

Figura 7. Comportamiento de la remoción relativa de turbiedad en el FGDe



En los casos donde se presentaron turbiedades elevadas muestras siete (7) y ocho (8) el filtro se comporto de forma apropiada removiendo con valores próximos al promedio como se ve en la figura 7.

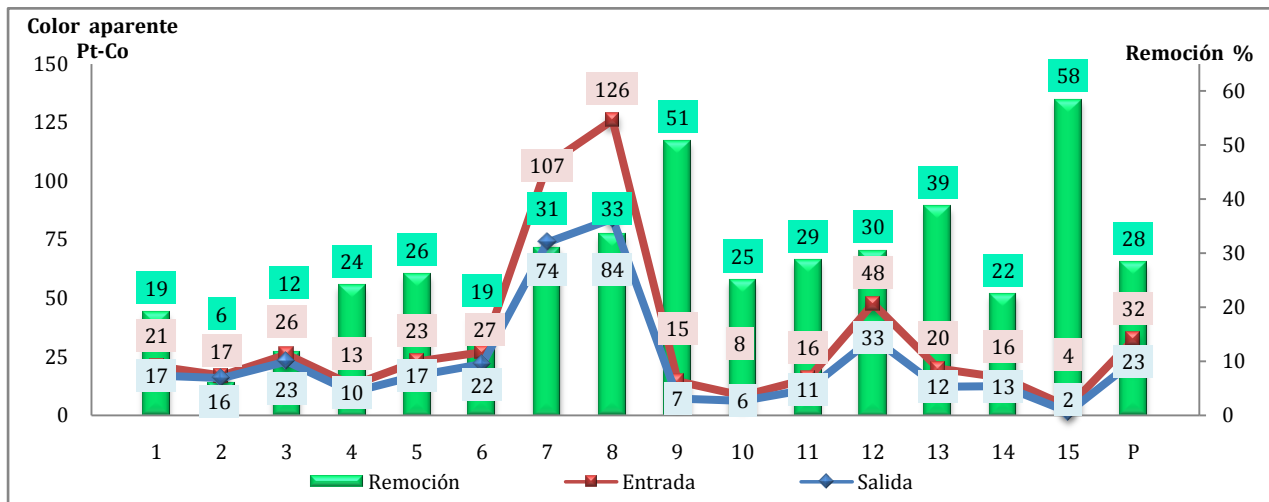
El comportamiento en las remociones de turbiedad respecto del ingreso al FiME tienen un promedio de 20.9% con una desviación estándar de 8.9, un valor mínimo de 8.0% y un máximo del 37.7%, siendo notorio el cambio a partir de las modificaciones realizadas en el sentido de flujo y los lechos filtrantes, muestra seis (6).

Los valores de turbiedad a la salida tienen un promedio de  $10.3 \pm 6.8$  UNT, con un rango de 1.7 a 43.7, siendo muy amplio, debido a los dos picos de turbiedad presentados en noviembre de 2011, donde se permitió el ingreso de agua con valores de turbiedad superiores a los de diseño. Para los valores restantes el comportamiento es apropiado presentado remociones bajas para los valores de turbiedad menores como es de esperarse para este tipo de filtro.

### 3.3.2 Remoción color aparente en el FGDe

En la figura 60 se presentan las remociones de color aparente del FGDe respecto del sistema, notándose en general bajas remociones, siendo menores en las primeras seis muestras con un máximo de 17% para la número cinco, luego de realizados los cambios se logra un incremento en las remociones llegando a un máximo de 42%, para los valores pico de color aparente registrados en noviembre de 2011, las remoción de color aparente promedio fue 19.6%, con una desviación estándar de 10.1.

Figura 8. Comportamiento de la remoción relativa de color aparente en el FGDe



En los días cuando el agua ingreso con valores máximos de color aparente el filtro realizo remociones superiores al promedio, siendo apropiado el comportamiento. En ocho muestras las remociones son superiores al promedio.

Las remociones de color aparente del FGDe respecto del sistema en general son bajas, siendo menores en las primeras seis muestras con un máximo de 17% para la número cinco, luego de realizados los cambios se logra un incremento en las remociones llegando a un máximo de 42%, para los valores pico de color aparente registrados en noviembre de 2011, las remoción de color aparente promedio fue 19.6%, con una desviación estándar de 10.1.

El FGDe construido en un tanque plástico de 250 litros con una velocidad de filtración promedio de 0.38 m/h remueve el 28.2% del color aparente que le ingresa y tiene una remoción del 19.6% respecto del total del sistema.

### 3.4 Remociones en el Filtro Lento de Arena FLA

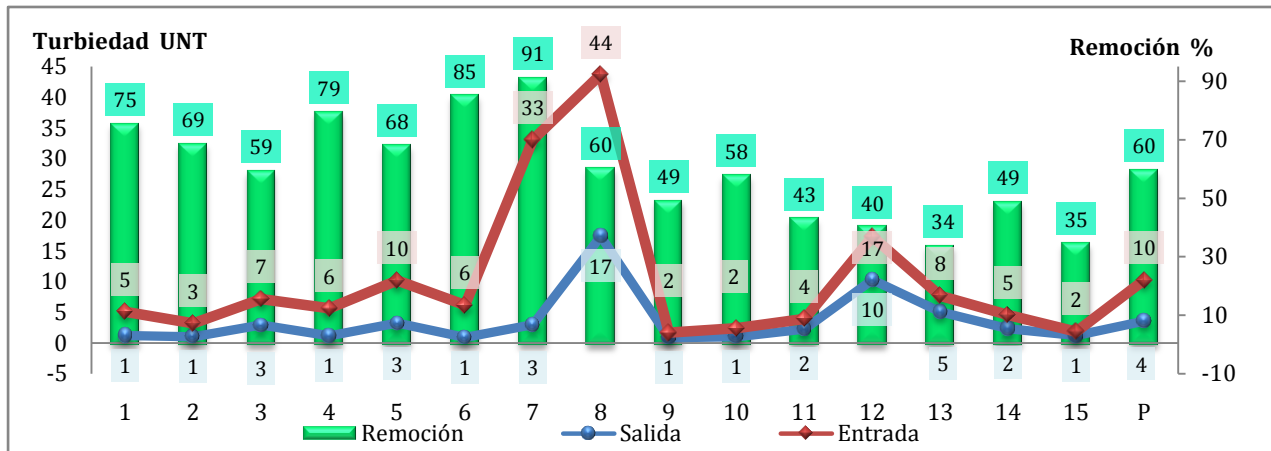
El FLA es el tercer y último filtro del sistema FiME, su principal función es remover los microorganismos presentes en el agua siendo un filtro biológico, además remueve la turbiedad y color aparente restantes de las unidades anteriores, a continuación de describe su comportamiento.

El caudal de diseño del filtro fue 30 ml/s y el de operación  $27.3 \pm 2.4$ , reducido por las fugas en las anteriores unidades, con un mínimo de 25.8 y un máximo de 32.6 ml/s. La velocidad de filtración de diseño fue 0.24 m/h, y la de operación promedio fue de  $0.22 \pm 0.02$ .

La turbiedad en el FLA presento un comportamiento similar a los dos filtros anteriores en los días donde el agua ingreso con valores superiores a los de diseño en noviembre de 2011 como se observa en la figura 9, para el primer día muestra siete (7) la remoción fue la máxima 91% y la salida aceptable con una turbiedad de 2.98 UNT, para la siguiente muestra la salida fue de 17.4 UNT estando fuera de valor exigido

por la resolución 2115 de dos (2) unidades, debido a la acumulación de material en el filtro por las continuas lluvias.

Figura 9. Comportamiento de la remoción relativa de turbiedad en el FLA

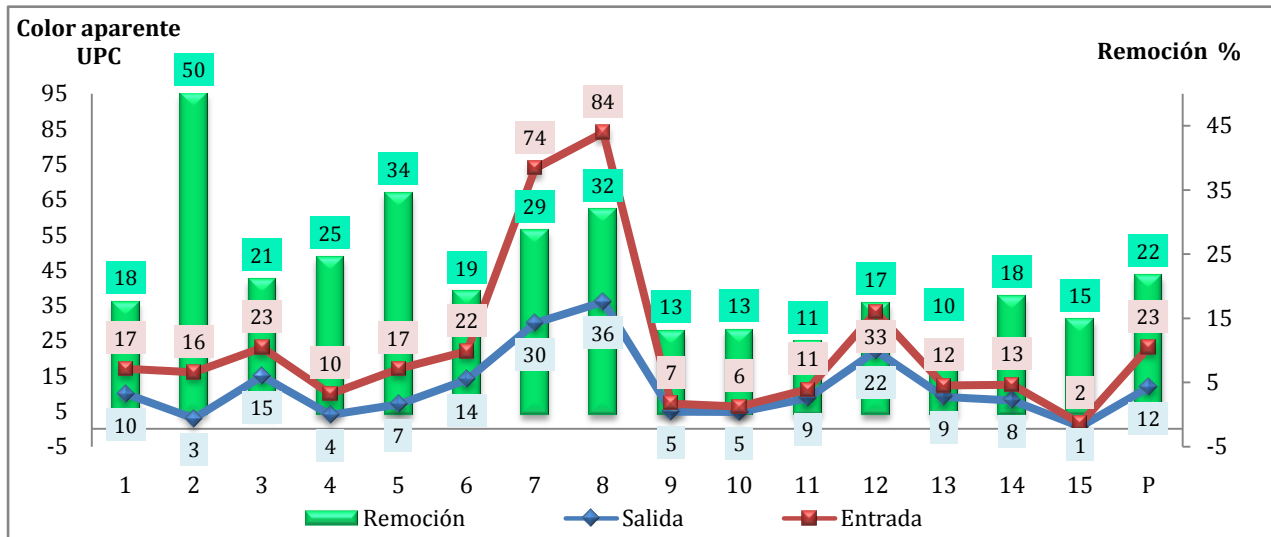


Las remoción del FLA respecto del sistema fue un promedio de 21.8%, la menor fue del 34% para el primer día de turbiedad elevada con una salida de 2.98 UNT siendo próxima al valor requerido. Las remociones tienen un comportamiento irregular en el transcurso del monitoreo, únicamente en tres muestras se presentan turbiedades fuera del promedio, siendo posible mejorar la eficiencia evitando picos de sólidos en el agua.

### 3.4.1 Remoción color aparente en el FLA

El comportamiento de la remoción de color aparente en el filtro lento es variable, con valores elevados en los primeros ocho monitoreos y luego desciende por debajo del promedio, sin embargo los valores son próximos a los requeridos en la mayoría de los casos como se aprecia en la figura 11.

Figura 10. Remoción color aparente en el FLA respecto del sistema



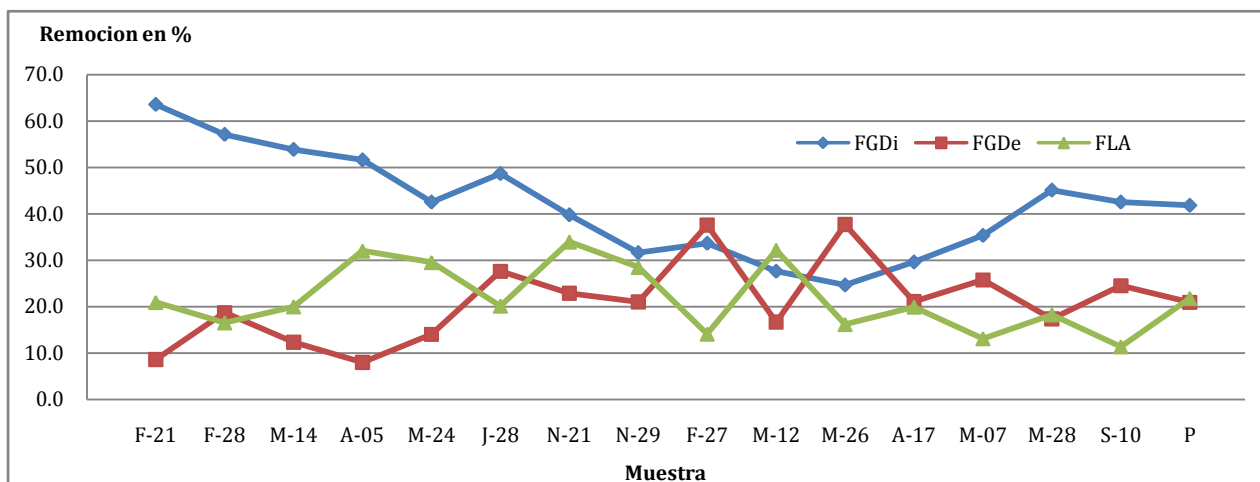
La remoción de color aparente en el FLA respecto del sistema fue en promedio de 21.7% siendo en la mayoría de los casos menor al promedio y fueron relativamente bajas debido al espesor de la capa arena. Los valores de salida están dentro del rango en el segundo periodo de monitoreo exceptuando la muestra 12, cuando se operó el sistema sin el mantenimiento apropiado.

### 3.5 Remoción de turbiedad en el sistema FiME

La turbiedad de salida tiene una relación directa con la de ingreso, la correlación entre las dos es de 0.684, siendo notoria la tendencia. El comparativo de las remociones de turbiedad en cada unidad de filtración del sistema se presenta en la figura 11 para las 15 muestras tomadas.

El FGD<sub>i</sub> inicia con una remoción inicial alta decreciendo hasta la muestra 11 donde cambia para incrementar de nuevo, siendo el comportamiento más uniforme y tiene la mayor eficiencia con un 41.8% del total del sistema. La disminución en la remoción del FGD<sub>i</sub> coincide con el incremento en el FGDe y en el FLA, las que se van alternando a lo largo de todo el monitoreo y terminan con una remoción promedio muy similar de 20.9% y 21.8% respectivamente.

Figura 11. Remoción turbiedad en los tres filtros del sistema FiME



La remoción en el FGDe al contrario del FGD<sub>i</sub> es muy baja inicialmente durante los primeros meses y cambia a partir del momento donde se modifica la estratificación de los lechos y el sentido de flujo muestra ocho (8). Las remociones a partir de este punto fueron mayores a las iniciales.

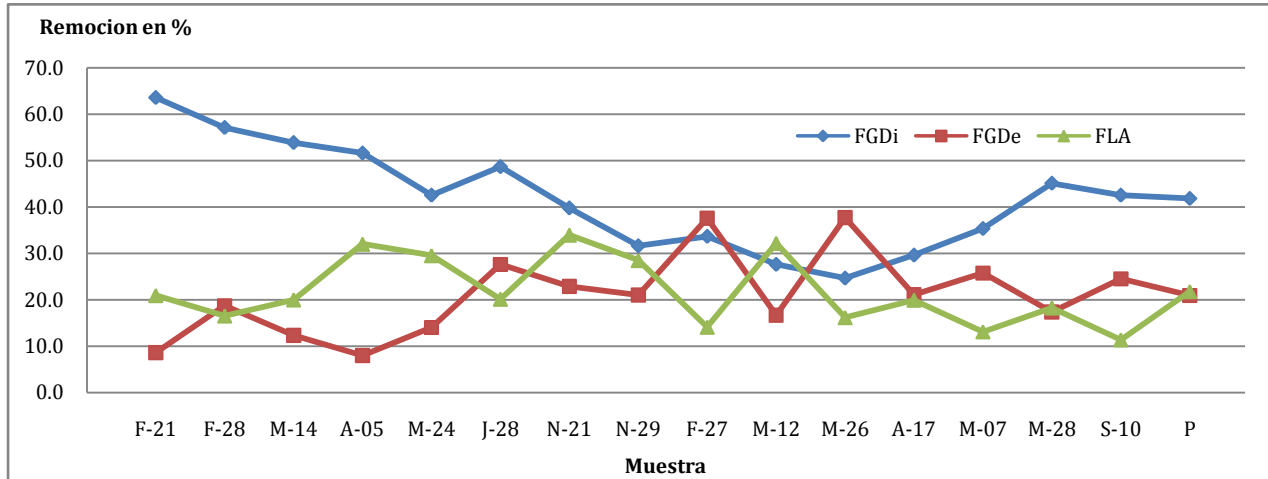
La remoción del FLA presenta la mayor variación de los tres filtros, no tiene un comportamiento definido en el tiempo, no es notoria la diferencia con el cambio de arena de río por arena sílice, más fina y uniforme realizado en julio de 2012.

### 3.6 Remoción de color aparente en el sistema

El color aparente del agua al ingreso del FiME es variable con dos puntos de valores máximos donde el sistema presento tres salidas superiores a las exigidas, en los demás casos cumplió

En la figura 12 se presenta el comparativo de las remociones de color aparente en cada unidad del sistema, siendo diferente para cada una y sin tendencias definidas en las muestras correspondientes al año 2011, en la segunda parte año 2012 se ve un comportamiento similar en los tres filtros siendo mayor en el FGD<sub>i</sub>, en segundo lugar el FGD<sub>e</sub> y las menores remociones se presentan en el FLA, aunque en promedio los filtros tuvieron un promedio similar.

Figura 12. Remoción turbiedad en los tres filtros del sistema

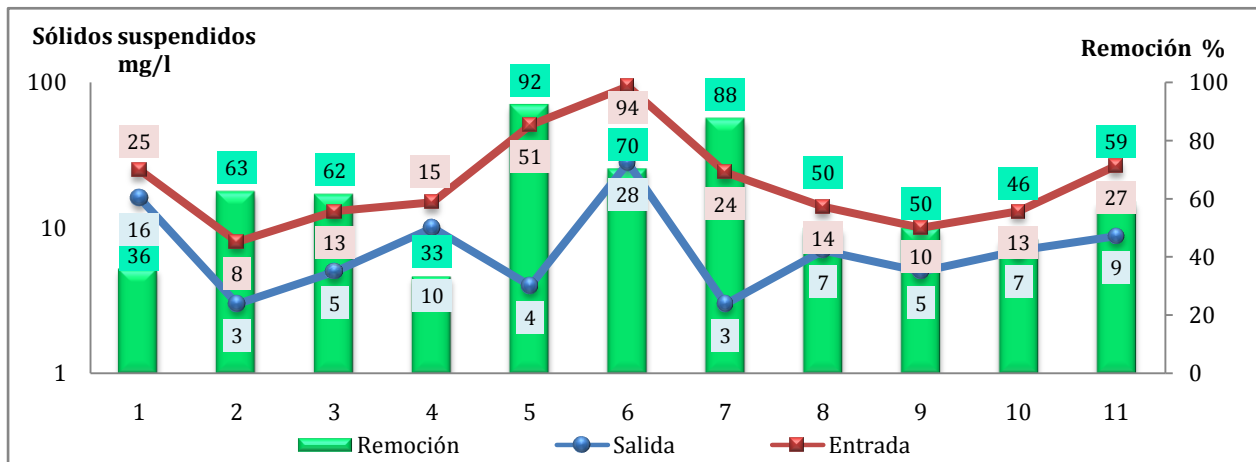


Las remociones en color aparente son inferiores a las logradas en turbiedad, debido a los valores elevados de ingreso, siendo necesario establecer una solución para incrementar su eficiencia. La remoción total de color aparente del FiME construido en tanques de plástico fue de 72.6%.

### 3.7 Remoción de sólidos suspendidos en el sistema

La remoción de sólidos suspendidos totales fue evaluada en el sistema, con variaciones considerables al presentarse valores de ingreso mínimos inferiores a 3.0 mg/l (valor mínimo de medición) y un máximo de 94 mg/l, con un promedio de 26.7 mg/l. En la figura 13 se observan las remociones para los valores de ingreso superiores a tres unidades, los demás registros se omitieron por ser inferiores al rango de medición.

Figura 13. Remoción sólidos suspendidos en el sistema

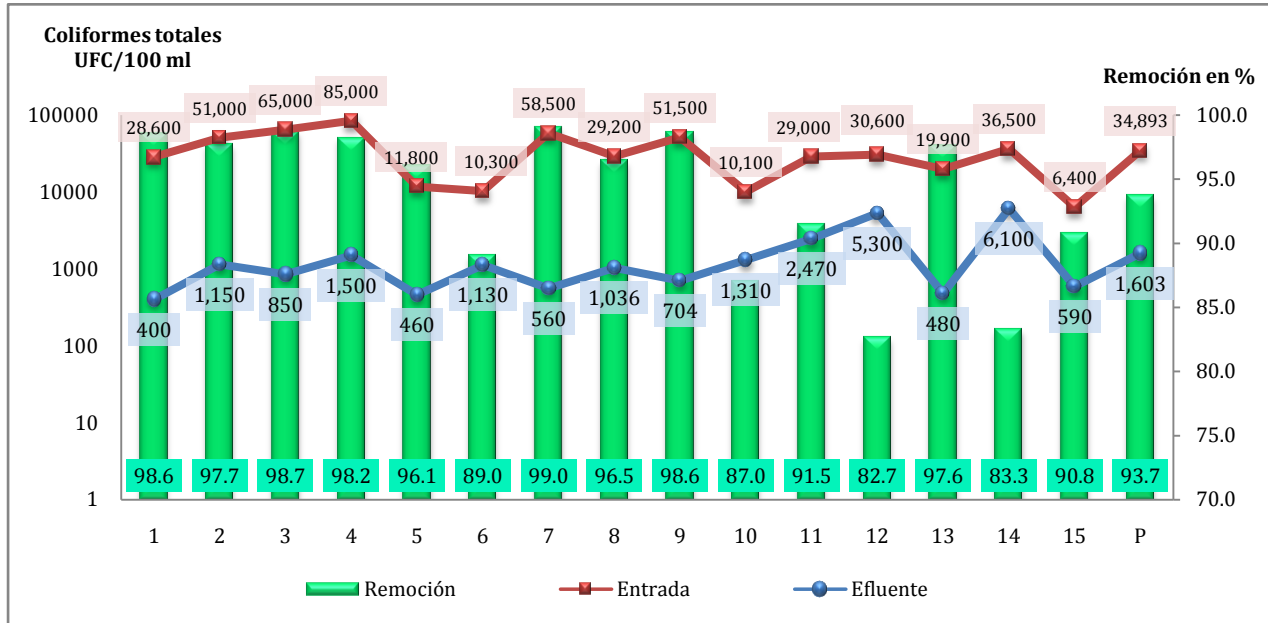


El promedio de sólidos suspendidos de salida fue de 8.8 mg/l, con una remoción del 59%, siendo la menor de los indicadores físicos evaluados. La resolución 2115 no establece un valor máximo.

### 3.8 Remoción de coliformes totales

La cantidad de coliformes totales de ingreso al sistema es considerable, tiene un promedio de 34,893 UFC/100 ml, un máximo de 85,000 dado en el primer año de monitoreo, para el 2012 el máximo fue 51,500 iniciando el periodo como se observa en la figura 14. El comportamiento en los valores de salida se regula dando como promedio 1,600 UFC/100 ml con un máximo de 6,100, siendo alto, también se presento un valor de 5,300 alejándose considerablemente de la media, los otros días los valores son próximos al promedio con un mínimo de 400 UFC/100 ml.

Figura 14. Remoción de coliformes totales en el sistema



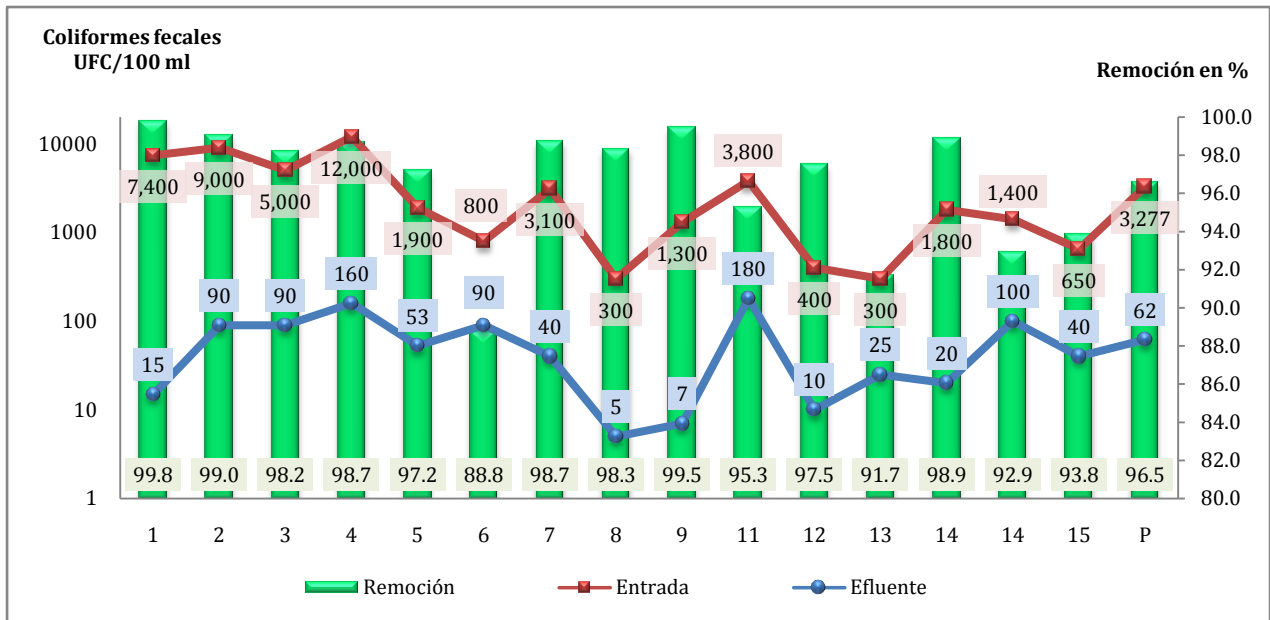
Las remoción de coliformes totales en el sistema fue en promedio de 93.7%, viéndose afectado por los dos valores próximos al 80%, en las muestras 12 y 14. En los días con los picos de turbiedad las remociones fueron superiores al promedio. La remoción máxima fue del 99.0% para la muestra siete, siendo uno de los valores máximos de entrada. Los valores de remoción deberían ser superiores, por ello se deben mejorar las condiciones de operación del filtro respecto de espesor de arena, velocidad de filtración y mantenimiento.

### 3.9 Remoción de coliformes fecales

La cantidad de coliformes fecales al ingreso del sistema tiene valores máximos en el primer año de monitoreo periodo durante el que se presentan los mayores como se aprecia en la figura 15, para el segundo periodo solo se tiene en dato de 3,800. El valor máximo registrado al ingreso fue 12,000 UFC/100 ml, con una salida de 160 y remoción del 98.7%.

El promedio de ingreso fue 3,300 UFC/100 ml, y salida de 62 UFC/100 ml, con una remoción promedio del 96.5%, siendo mejor a la lograda en coliformes totales.

Figura 15. Remoción de coliformes fecales en el sistema



Los registros de coliformes máximos en la salida corresponden a los días de mayor cantidad de ingreso en los dos periodos, para el caso de la muestra 14 el filtro están sin mantenimiento, siendo posiblemente la causa de la baja remoción. La cantidad de coliformes de salida es relativamente baja respecto del ingreso siendo necesaria la aplicación de un desinfectante para remover los restantes y cumplir con la normatividad con el cloro residual para evitar la contaminación del agua después del tratamiento.

La eficiencia en remoción de coliformes se puede incrementar mejorando la remoción de color aparente del agua modificando los parámetros de operación o el espesor de la capa de arena en el FLA.



### 3.10 Comportamiento de otros indicadores en el sistema

De acuerdo a la resolución 2115 se deben verificar en el agua otros indicadores para garantizar la calidad sea apta para el consumo humano, por ello se evaluaron los que el Laboratorio analiza, en la tabla 4 se presentan los resultados y se compara con la normativa.

**Tabla 4.** Comportamiento indicadores en el sistema

Indicador	Unidad	Ingreso	Salida	Norma
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	109.1	106.4	200
Calcio	mg/l Ca	54.0	50.8	60
Conductividad	μS/cm	344	348	1000
Cloruros	mg/l Cl <sup>-</sup>	3.7	3.3	250
Dureza total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	146.0	142.0	300
Hierro total	mg/l Fe	1.02	0.05	0.3
Potencial Hidrógeno	und pH	7.65	7.68	6.5 - 9.0
Magnesio	mg/l Mg	2.6	3.7	36
Nitratos	mg/l N-NO <sub>3</sub>	0.2	0.2	10
Nitritos	mg/l N-NO <sub>2</sub>	0.0	0.0	0.1
Sulfatos	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	59.4	70.0	250

Según los resultados de la tabla 4 el agua a la salida del sistema cumple con las exigencias de la resolución en los indicadores evaluados, en algunos casos como el magnesio se presenta un incremento aún así se continúa con un valor menor al exigido. El hierro total inicialmente tiene un valor superior al requerido, el sistema logra una remoción del 95% y cumple con lo estipulado.

## 4 DISCUSIÓN

La remoción total de turbiedad del FiME construido en tanques de plástico fue de 84.6% el resultado es similar al obtenido por Naranjo 2009, con una remoción del 90% utilizado filtros con mayores espesores en los lechos y valores de turbiedad de ingreso similares en promedio.

La remoción total de color aparente fue de 72.6%, siendo inferior a los obtenida por Naranjo 2009, con una remoción del 86%, la diferencia puede ser por la utilización de antracita en el FGA y mayor espesor en los lechos filtrantes.

Según Sánchez et al, (2006: 16) el efluente de la filtración gruesa debe tener una turbiedad entre 10 y 20 UNT, en este caso se cumple al tener un promedio de 10 unidades.

Según Galvis et al (1999:118) las remociones de sólidos suspendidos deben ser entre 70 y 80%, superiores a las logradas por los filtros gruesos para el rango en el que se encuentra la concentración de sólidos.

Las remoción de coliformes totales en el sistema fue en promedio de 93.7% con salida de 1600 UFC/100 ml, al comparar con los valores obtenidos por Naranjo en 2009, se encuentra una diferencia respecto de las 555 UFC/100 ml de salida logrado, la diferencia se debe a los valores elevados de ingreso en el caso del FiME en Majavita con un promedio próximo a los 35,000.

Respecto a los coliformes fecales el FiME evaluado en la Universidad de Antioquia por Naranjo con un promedio de ingreso de 140 UFC/100 ml se logro salida de 0 UFC/100 ml, cantidad muy inferior a los valores del caso en estudio, teniendo un promedio de ingreso de 3300 UFC/100 ml y salida de 62.

## **5 CONCLUSIONES**

El pre-sedimentador con matriz de botellas plásticas remueve turbiedad por la adhesión de las partículas en el interior y exterior de los recipientes, es mayor cuando es considerable la cantidad de sólidos presentes en el agua, para su correcto funcionamiento se debe realizar un mantenimiento continuo para evitar la colmatación de las botellas y posterior flujo de sólidos hacia la siguiente unidad.

La utilización de las botellas plásticas es una alternativa para las matrices de los sedimentadores por su facilidad de construcción, valor bajo respecto de las tejas plásticas, comodidad para el lavado y el poder contribuir con la reutilización de un material accesible en el entorno que normalmente se convierte en un desecho contaminante.

Las eficiencias en remoción de turbiedad de los FGDi en concreto y de su equivalente en tanque plástico son similares, dando como resultado una semejanza significativa entre las dos unidades, operando el de concreto con una velocidad de filtración mayor. Luego es posible recurrir a tanques plásticos para este tipo de unidad y obtener resultados muy similares utilizando velocidades de filtración menores.

La remoción promedio del FGDe es la menor de los tres filtros debido a la altura total del lecho al ser menor al especificado, con los cambios realizados en la estratificación de los lechos filtrantes se logro mejorar las condiciones de operación y un incremento en la remoción de los indicadores turbiedad y color aparente.

Los resultados obtenidos en el FLA son satisfactorios al lograr tener una remoción próxima y valores de salida de los indicadores similares al equivalente en concreto con espesores de lecho filtrante menor, sin embargo el aspecto a analizar y mejorar es la remoción de microorganismos al requerirse salidas próximas a cero para garantizar la eliminación en la desinfección con cloro.

La implementación del retro lavado para los filtros gruesos es una ventaja considerable para su mantenimiento al disminuir el tiempo necesario para esta labor, logrando restablecer la operación en condiciones apropiadas el sistema y evitar dejar de suministrar agua para los usos establecidos.

El sistema FiME evaluado en tanques de plástico y bajo condiciones específicas de operación logro cumplir con el objetivo de mejorar la calidad del agua para los usos que se le están dando en la Hacienda Majavita al reportar valores en los rangos establecidos en la mayoría de los indicadores, siendo necesario algunos cambios para lograr suministrar agua potable y cumplir con la resolución 2115 a cabalidad, convirtiéndose en una alternativa viable para las fincas de la región donde se tenga un entorno apropiado.

El agua es un elemento vital para vivir por tanto se deben continuar haciendo esfuerzos significativos para garantizarle agua acta para el consumo a los habitantes del sector rural y así contribuir a brindarles una mejorar calidad de vida, siendo fundamental el cuidado y preservación en conjunto de las fuentes hídricas y el medio ambiente a su alrededor y ayudar a continuar el camino hacia el Desarrollo Sostenible.

### **5.1 Recomendaciones**

Entre las alternativas para mejorar al sistema se plantean las siguientes:

La eficiencia del sistema puede ser mejorada utilizando un filtro dinámico de protección FDiP con mayor velocidad de filtración según Galvis, instalado antes del FGDi para reducir la cantidad de sólidos de ingreso al FiME y atenuar los picos protegiendo el sistema de turbiedad o sólidos suspendidos.

La principal desventaja de utilizar tanques plásticos es la altura al ser inferior a las especificaciones dadas en la teoría, por ello se deben diseñar los filtros con velocidades de filtración menores dependiendo de las características del agua a tratar, en especial en el FLA, con la posibilidad de utilizar una unidad paralela garantizando tener todo el tiempo en operación un filtro.

La implementación de la desinfección con cloro para dar protección al agua, garantizando remover en su totalidad los microorganismos y cumplir con los requisitos de la resolución 2115 respecto de cloro residual.

## **5.2 Planes para el trabajo futuro**

Continuar haciendo actividades de protección en la fuente hídrica como trinchos para disminuir la cantidad de sólidos en el agua, el desvío del sendero aledaño al cauce, reforestación en la parte alta y media de la zona de vertiente. Establecer el origen de la gran cantidad de coliformes presentes en el agua. Establecer la zona de ronda en los predios en la margen izquierda del cauce.

## **6 AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa agradecimientos al ingeniero Andrés Felipe Suarez director de la investigación por los aportes realizados y su incondicional ayuda, a los compañeros del grupo de investigación en especial al ingeniero William Tolosa por los continuos aportes para mejorar el sistema, a todos los egresados del programa Ingeniería Ambiental quienes han realizado su proyectos de grado y pasantías contribuyendo en las mejoras al FiME y a los funcionarios del Laboratorio de Aguas y Microbiología especialmente a la química María Fabiola Arenas por su colaboración.

## **7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Ardila Otero, César David; Carrizosa Garzón Diego y Vega Serrano, Haimar Ariel. 2010. *Sistema de filtración en múltiples etapas FiME en unidades de polipropileno y concreto*. Revista El Centauro: Expresión Libre Comunera. ISSN: 2027-1212. Universidad Libre Seccional Socorro. No 4. Págs.: 39 - 51.

Avendaño Suárez, Andrés Leonardo; Hernández Mercado, Edwin Rafael y Vega Serrano Haimar Ariel. 2010. *Características de operación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME*. Revista El Centauro: Expresión Libre Comunera. ISSN: 2027-1212. Universidad Libre Seccional Socorro. No. 5. Págs.: 7 - 15.

CGR. 1996. Encuesta sobre cantidad y calidad del agua potable en Colombia. El estado de los recursos naturales y del ambiente. Contraloría General de la República.

CGR. 1996. *Encuesta sobre cantidad y calidad del agua potable en Colombia. El estado de los recursos naturales y del ambiente*. Contraloría General de la República.

CIMAD. 2010. Gestión integral del recurso Hídrico. Maestría en desarrollo sostenible y medioambiente - Centro de Investigaciones en Medioambiente y Desarrollo. Universidad de Manizales. Págs. 115.

Galvis Castaño, Gerardo; Latorre Montero, Jorge y Visscher, JanTeun. 1999. *Filtración en múltiples etapas tecnología innovativa para el tratamiento de agua*. Universidad del Valle. Cinara. IRC.

Mondaca J., María Angélica y Campos A., Víctor. 2005. *Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales*. Capitulo libro: Agua potable para comunidades rurales, re uso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd57/riesgo.pdf>

Naranjo Fernández, Darío. 2009. *Desarrollo de un sistema compacto de potabilización*. Informe Tesis de Maestría. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental - GIGA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

OPS/CEPIS. b. 2005. *Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas*. Organización Panamericana de la Salud. [http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/030\\_Construcci%C3%B3n\\_tratamiento\\_Filtraci%C3%B3n\\_ME/Construcci%C3%B3n\\_tratamiento\\_Filtraci%C3%B3n\\_ME.pdf](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/030_Construcci%C3%B3n_tratamiento_Filtraci%C3%B3n_ME/Construcci%C3%B3n_tratamiento_Filtraci%C3%B3n_ME.pdf)

Rojas, Ricardo. 2002. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Gestión integral de tratamiento de aguas residuales Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud.

Rojas, Ricardo. 2002. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Gestión integral de tratamiento de aguas residuales Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud.

**Sánchez Torres**, Luís Dario. **1996**. *Limpieza de la Biomembrana en un Filtro Lento en Arena y su efecto al inicio de la carrera de filtración*. Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua; Universidad del Valle. Postgrado de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago de Cali; CINARA. Págs. 160. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/brasil20/ii-020.pdf>