

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN EN  
FILTROS LENTOS EN ARENA CON EL USO DE GEOTEXILES NT**

**JAVIER LEYTON LUNA  
ANDRÉS FELIPE CAPOTE MUÑOZ**

**Director:  
JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA  
Ingeniero Sanitario, M.Sc, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIRÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÀN  
2018**

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN EN  
FILTROS LENTOS EN ARENA CON EL USO DE GEOTEXTILES NT**

**JAVIER LEYTON LUNA  
ANDRÉS FELIPE CAPOTE MUÑOZ**

**TRABAJO DE GRADO MODALIDAD INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL  
TÍTULO DE INGENIEROS AMBIENTALES**

**Director:  
JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA  
Ingeniero Sanitario, M.Sc, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIRÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÀN  
2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres, Lina, Eivar, Francisco y Maribel por ser nuestros principales pilares durante el transcurso de la carrera y de nuestras vidas.

A nuestros hermanos, Luis Capote y Eliana Leyton por su incondicional apoyo día tras día.

A nuestros demás familiares y amigos, por todas las risas, buenos momentos y compañía en los momentos más difíciles a lo largo de esta etapa.

A nuestro director Javier Fernández, por su tiempo, dedicación y excelente orientación en nuestra etapa final de este largo recorrido.

A los funcionarios de la planta de alimentos perteneciente a la facultad de ciencias agrarias de la Universidad Del Cauca, en especial al laboratorista Wilson.

A nuestra alma máter la Universidad del Cauca por formarnos como profesionales.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
2. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA .....	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1 OBEJETIVO GENERAL .....	4
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	4
4. MARCO TEORICO .....	4
4.1 FILTROS LENTOS EN ARENA (FLA).....	4
4.2 FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FiME) .....	6
4.3 GEOTEXILES SINTETICOS.....	7
5. METODOLOGIA.....	8
5.1 ZONA DE ESTUDIO.....	8
5.2 CONDICIONES GENERALES DE LA PLANTA PILOTO .....	9
5.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS FLA A ESCALA PILOTO.....	10
5.4 ESTUDIO GRANULOMÉTRICO.....	11
5.5 DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
5.5.1    OBJETIVO ESPECÍFICO 1 .....	12
5.5.2    OBJETIVO ESPECÍFICO 2 .....	12
6. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	13
6.1. CALIDAD DEL AGUA AFLUENTE .....	13
6.2. CAUDAL MEDIDO Y VELOCIDAD DE FILTRACIÓN PROMEDIO.....	15
6.3. EFECTO DE MADURACIÓN. ....	16
6.4. CALIDAD DEL AGUA TRATADA .....	17
6.4.1. CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL AGUA TRATADA .....	17
6.4.2. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA TRATADA .....	24
6.5. COMPORTAMIENTO DE LA PÉRDIDA DE CARGA .....	28
CONCLUSIONES.....	33
RECOMENDACIONES .....	34
BIBLIOGRAFÍA .....	35
ANEXOS.....	37

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Componentes básicos de un filtro lento en arena.....	5
<b>Figura 2.</b> Esquema general de una planta FiME.....	6
<b>Figura 3.</b> Vista en planta y perfil de la planta piloto. ....	9
<b>Figura 4.</b> Características del filtro lento a escala piloto.....	10
<b>Figura 5.</b> Estudio granulométrico de la arena utilizada en el lecho filtrante.....	11
<b>Figura 6.</b> Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua afluente y efluente a lo largo del tiempo. ....	17
<b>Figura 7.</b> Dispersión de los datos de remoción de turbiedad para cada FLA.....	19
<b>Figura 8.</b> Dispersión de los datos de remoción de color aparente para cada sistema FLA.	21
<b>Figura 9.</b> Dispersión de los datos de remoción de UV 254 nm para cada sistema FLA .....	23
<b>Figura 10.</b> Pérdida de carga específica en cada filtro.....	28
<b>Figura 11.</b> Porcentajes de pérdida por arena, geotextil y material de soporte para cada filtro en el último día de funcionamiento. ....	29

## LISTA DE FOTOS

<b>Foto 1.</b> Planta piloto.....	9
<b>Foto 2.</b> Instalación de geotextil sobre el lecho de arena por medio de aro de hula hula.....	10

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de calidad evaluados, métodos de referencia y equipos usados en la medición de calidad microbiológica y fisicoquímica. ....	12
<b>Tabla 2.</b> Localización de los piezómetros en los FLA.....	13
<b>Tabla 3.</b> Parámetros Físico-Químicos y Microbiológicos del agua afluente.....	14
<b>Tabla 4.</b> Caudales de entrada para los filtros lentos en arena.....	15
<b>Tabla 5.</b> Parámetros Fisico-Químicos de entrada y salida.....	17
<b>Tabla 6.</b> Valores de comparación entre COT y UV 254 nm encontrados en la literatura. ..	22
<b>Tabla 7.</b> Valores de pH y temperatura a la entrada y salida. ....	24
<b>Tabla 8.</b> Concentraciones de coliformes totales y eficiencias de remoción. ....	25
<b>Tabla 9.</b> Concentraciones de coliformes fecales y eficiencias de remoción.....	26
<b>Tabla 10.</b> Duraciones de Carrera de Filtración.....	30
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de lodo en la arena post filtración.....	31

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Datos obtenidos para las características fisicoquímicas .....	37
<b>Anexo 2.</b> Seguimiento y control de caudales de entrada y velocidades de filtración. ....	38
<b>Anexo 3.</b> Datos de eficiencias obtenidas en la remoción de parámetros fisicoquímicos. ....	39
<b>Anexo 4.</b> Datos de conteo de coliformes fecales y totales con sus respectivos porcentajes de remoción. ....	40
<b>Anexo 5.</b> Datos de pérdida de carga de los sistemas de filtración lenta en arena. ....	41
<b>Anexo 6.</b> Datos estadísticos de la remoción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. ....	42

## INTRODUCCIÓN

El agua ha estado presente en todas las actividades del hombre, como elemento vital de su desarrollo condicionando su propia supervivencia; esto ha llevado a idear y desarrollar las más diferentes formas de aprovechamiento. La escasez del recurso, la dificultad de acceso y la mala calidad van de la mano de la pobreza y un abastecimiento adecuado de agua potable es necesario para evitar diferentes tipos de enfermedades como el cólera y la diarrea.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), la meta mundial planteada por los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) para el agua potable fue proyectada en que un 88 % de la población mundial tuviera acceso a fuentes mejoradas para el 2015, meta que fue alcanzada y superada en el 2010. Actualmente un 91 % de la población tiene acceso a agua potable, un notable aumento en comparación con el 76% de 1990. Aunque el aumento del suministro de agua potable ha sido bastante notable a nivel mundial, en países con una gran población en zona rural aún representa una problemática. Según el Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano (SIVICAP) en Colombia para el año 2012 alrededor de un 72.7% de la población fue abastecida de agua segura y suministrada por acueducto; mientras que un 27.4% aún no tienen acceso a agua de buena calidad.

La filtración en múltiples etapas (FiME) surge como una alternativa, la cual se caracteriza por ser una tecnología de fácil operación y mantenimiento. A diferencia de la filtración rápida, la cual opera con el uso de coagulantes químicos, las plantas de filtración en múltiples etapas operan con procesos físicos y biológicos los cuales remueven de manera eficiente parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua, lo cual constituye una tecnología limpia que opera sin dejar rastros residuales. Estas ventajas hacen que la tecnología FiME sea ideal para las comunidades rurales y lugares de difícil acceso, sin embargo, el costo de inversión inicial que la planta de tratamiento requiere para su construcción puede llegar a ser mayor al de los sistemas convencionales, razón por la cual surge la necesidad de búsqueda de opciones que permitan hacer la tecnología más factible y asequible económicamente.

El uso de Geotextiles no tejidos (Geotextiles NT) los cuales poseen características hidráulicas que favorecen su uso en el tratamiento de agua potable y proporcionan una optimización en la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento, debido a que estos tienen la capacidad de incrementar la carrera de filtración de los Filtros Lentos en Arena (FLA).

El presente documento contiene el reporte de la investigación realizada sobre la evaluación del geotextil NT 1600 y altas velocidades de filtración (superiores a 0.20 m/h) en filtros lentos en arena y su impacto en la pérdida de carga, calidad fisicoquímica y microbiológica.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia cuenta con un rendimiento hídrico promedio que equivale a 6 veces el promedio mundial y a 3 veces el de Latinoamérica; además de reservas de aguas subterráneas que triplican esta oferta y se distribuyen en el 74% del territorio nacional. (IDEAM, 2015). A pesar de la gran disponibilidad del recurso hídrico, en algunos sectores del país no se cuenta con un sistema de acueducto apropiado y/o una adecuada red de distribución. Según el MinSalud (2013), en las últimas dos décadas, aumentó la cobertura de agua potable por tubería de 96 a 97% en la zona urbana y con leve mejoría de 58 a 61% en la zona rural, para el mismo periodo. Claramente el déficit de cobertura en la zona Rural es preocupante y su población debe enfrentarse a una grave situación debido a la falta de agua potable.

En la actualidad el IRCA ha venido siendo el indicador determinante de la vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano, con el cual podemos determinar el grado de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua estipuladas en la Resolución 2115 de 2007

Según el Informe Nacional de Calidad del Agua para consumo humano (INCA) 2015, en los grandes y medianos centros urbanos del país, sus habitantes reciben un suministro de agua de buena calidad, Sin Riesgo o riesgo Bajo para la salud humana y que en la medida que disminuye su tamaño urbano y la ruralidad aumenta, la calidad del agua desmejora aumentando su nivel de riesgo, de tal manera que en los municipios menores y en el área rural el IRCA es predominantemente Alto y en algunos casos Inviabile Sanitariamente.

Del total de la población vigilada para 2014, aproximadamente 5.5 millones de habitantes consumieron agua con bajo o nulo tratamiento y 2.6 millones agua inviable sanitariamente, posiblemente directamente de la fuente; se evidencia que un alto porcentaje de la población nacional podría presentar enfermedades vehiculizadas por el agua impactando negativamente la salud pública. En la zona rural del país se presentó un IRCA promedio del 45.2% correspondiente a un nivel de riesgo alto, lo que resalta las falencias en cuanto al abastecimiento de agua de buena calidad en este sector del país.

La situación en la prestación de los servicios de suministro de agua y saneamiento continúa presentando limitaciones y deficiencias que colocan en riesgo la sostenibilidad de las inversiones e intervenciones realizadas en el sector, y estas deficiencias son mayores en la zona rural y en el pequeño municipio. Uno de los aspectos que se acepta es el hecho que la inmensa mayoría de los municipios recibió la responsabilidad de la prestación de estos servicios, sin un proceso de transición mínimo que les permitiera potenciar y fortalecer su capacidad técnica, administrativa y financiera. CEPAL (2000).



Para mejorar la eficiencia, calidad, cobertura, la continuidad, gestión y planeación en la prestación de los servicios públicos, se deben superar varias barreras como la deficiente gestión empresarial y operativa, la baja capacidad de inversión y capital, deficiente capacitación técnica y rezago tecnológico, regulación, vigilancia y control inadecuado. CEPAL (2000).

Teniendo en cuenta estos factores, se aumenta la necesidad de disponer e implementar alternativas que faciliten la prestación del servicio de agua potable de una forma viable y eficaz en el sector rural del país.

## **2. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA**

La difícil adaptación y mantenimiento de las tecnologías convencionales en el sector rural, han limitado el abastecimiento de agua potable de calidad en algunas zonas del país, por su ubicación y complicado acceso, la viabilidad de transportar los productos químicos requeridos para el tratamiento del agua mediante esta tecnología es baja.

El uso de la tecnología de Filtración en Múltiples Etapas (FiME), es una de las alternativas que puede suplir el proceso convencional de potabilización de agua, por su fácil operación y bajos costos de mantenimiento, además de no requerir productos químicos para su funcionamiento. La combinación de filtros en grava (Filtros Dinámicos y Filtros gruesos) y los filtros lentos en arena (FLA) que utiliza FiME, contribuye a la alta eficiencia de remoción microbiana. A pesar de todas sus ventajas, la tecnología FiME sigue presentando algunas limitaciones como carreras de filtración cortas, que demandan una alta dedicación del operador en labores de operación y mantenimiento. De otro lado los costos de inversión inicial de los FLA, comparado con el costo de la planta de tratamiento, puede alcanzar entre 45% y 65% (Fernández et al. 2001).

En estudios realizados por Pádua y Di Bernardo (1998), se observó que las propiedades físicas de Geotextiles NT ejercen gran influencia en la capacidad de retención de impurezas y en el desarrollo de la pérdida de carga, además en los experimentos realizados en la instalación piloto, el Geotextil NT posibilitó aumentar la duración de carrera de los filtros en arena con un factor de aumento de dos a tres veces.

La velocidad de filtración de 0.15 a 0.3 m/h con la que trabajan los FLA, esta inversamente relacionada con la duración de carrera, por lo que la adecuada utilización de los Geotextiles NT contribuiría a un aumento de la velocidad de filtración, compensando así la disminución de la duración de carrera que este incremento en la velocidad provocaría; el incremento en la velocidad de filtración permitiría reducir el área de los FLA, lo que conlleva a una

minimización de los costos iniciales de inversión y que la tecnología sea aun más viable para zonas rurales.

Sin embargo, faltan estudios que permitan viabilizar el uso de velocidades de filtración más altas a las utilizadas normalmente en FLA.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBEJETIVO GENERAL**

Evaluar el uso de un Geotextil NT con velocidades de filtración superiores a 0,2 m/h y su impacto sobre la calidad de agua y duración de carrera en filtros lentos en arena.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Valorar el impacto del uso de Geotextiles NT y la velocidad de filtración en la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua efluente en filtros lentos con velocidades de 0.2 y 0.5 m/h.
- Evaluar el impacto del uso de Geotextiles NT y la velocidad de filtración en la pérdida de carga de los filtros lentos con velocidades de filtración de 0.2 y 0.5 m/h.

### **4. MARCO TEORICO**

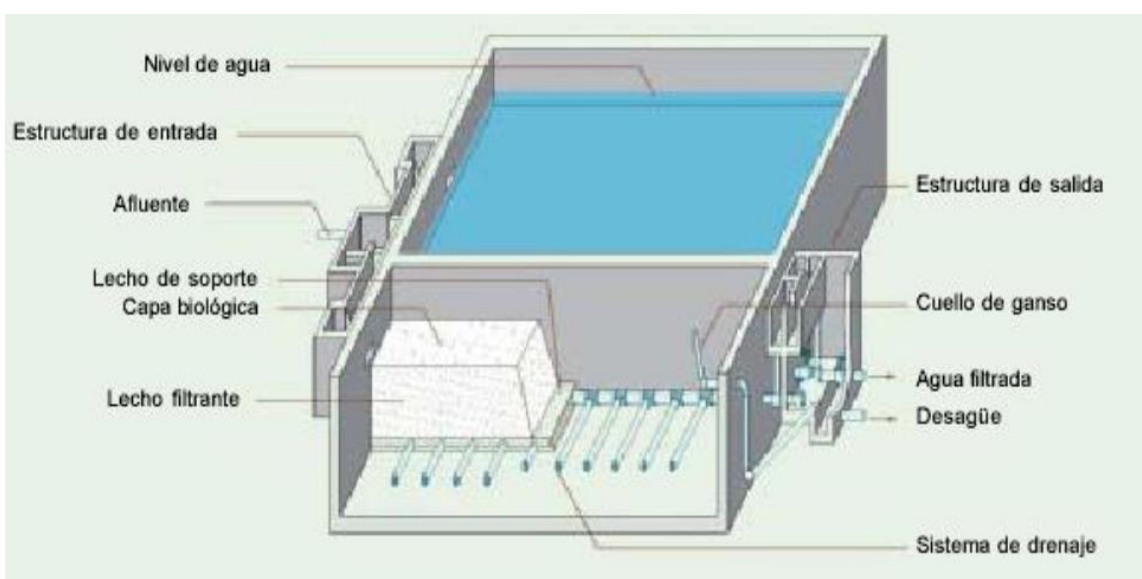
#### **4.1 FILTROS LENTOS EN ARENA (FLA)**

La filtración lenta es un eficiente método de producción de agua con satisfactoria calidad bacteriológica que obvia el uso de productos químicos, y requiere cantidades marginales del agente desinfectante en el agua antes de la distribución (SCHOLZ, 2006). Es una de las más antiguas tecnologías de tratamiento de agua. La primera estación de tratamiento de agua por filtración lenta fue construida en 1829, a principios del siglo XIX, por James Simpson, en Londres, para el abastecimiento público (HUISMAN e WOOD, 1974). (Tomado de De Souza, 2015)

Una unidad de FLA está conformada por una estructura que contiene un lecho filtrante, una capa de agua sobrenadante, un sistema de drenaje y el control del flujo. El tratamiento de agua con FLA es el resultado de una combinación de mecanismos biológicos y físico-químicos que interactúan de una forma compleja. La materia orgánica e inorgánica ingresa a las unidades de FLA junto con el flujo de agua sin tratar o pre-tratada, la cual pasa a través del medio filtrante por gravedad, mediante la presión que ejerce el agua sobrenadante que se encuentra encima del lecho de arena. La fotosíntesis favorece el crecimiento de algas que proporciona materia orgánica adicional, que se añade a la contaminación del agua. Esa

fuerza de nutrientes ayuda al crecimiento de bacterias y otros microorganismos que ayudan a que el material soluble sea removido del agua en el lecho de arena (Sanchez et al, 2007).

Las unidades de FLA deben operar con velocidades bajas de filtración, usualmente en el rango de 0.1 a 0.3 m/h. La velocidad no debe variar significativamente y para ello, el caudal a filtrar puede ser controlado a la salida o a la entrada. La estructura de una unidad de FLA consiste básicamente en un tanque con un lecho de arena fina, de diámetro efectivo entre 0.15 y 0.30 mm. Colocada sobre una camada de grava, que constituye el medio de soporte y transición. En el fondo del filtro se encuentra un sistema de drenaje que puede estar constituido por ladrillos, bloques de concreto porosos, o después de la experimentación de Cinara, por tubería corrugada perforada como la utilizada en drenaje de suelos (Galvis et al. 1999). En la figura 1 se muestra el esquema general de un filtro lento en arena.



**Figura 1.** Componentes básicos de un filtro lento en arena.

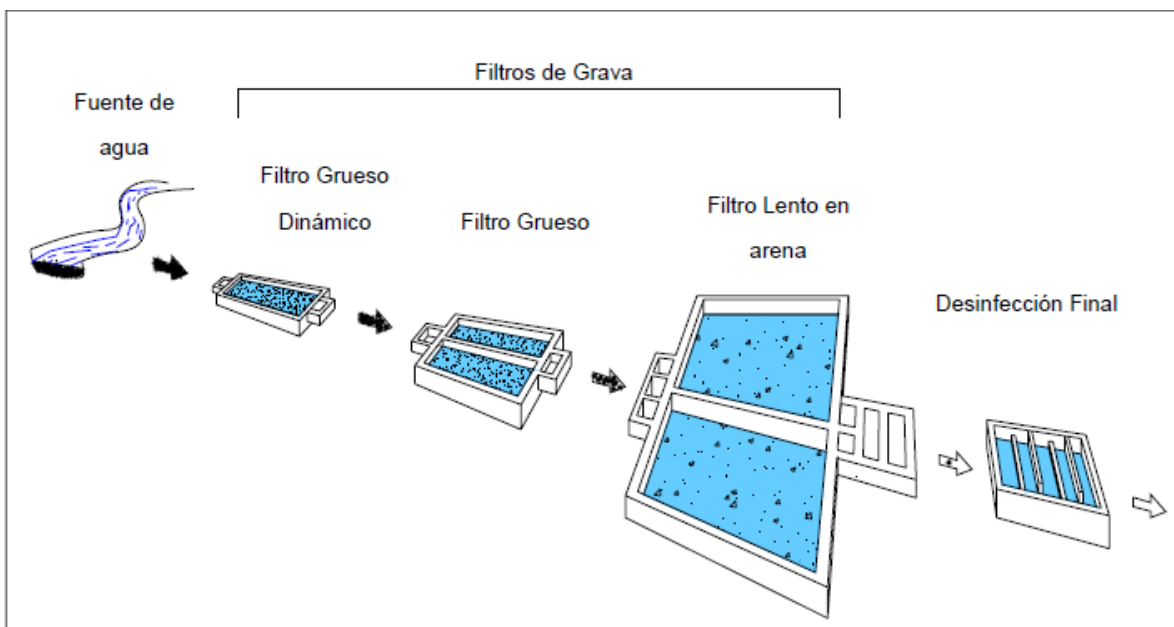
Tomado de: Apuntes de clase FiME, Javier Fernández.

El rendimiento del filtro lento depende principalmente del proceso biológico, mientras la capa biológica se desarrolla la eficiencia es baja y el proceso va mejorando a medida que progresa la carrera de filtración (comprendida entre el momento de inicio de la operación del filtro y el momento de la salida de funcionamiento del sistema para el lavado). Luego de un tiempo de funcionamiento, el cual depende directamente de la turbiedad del agua cruda, el filtro se colmata y es necesario interrumpir la carrera de filtración para lavar el sistema. La limpieza consiste en el raspado superficial de la arena; ésta posteriormente es lavada y almacenada. El espesor del lecho filtrante disminuye hasta valores límite, momento en el que la arena almacenada debe reponerse para restaurar el medio filtrante original. (Jaramillo, 2013)

Según Sánchez et al. (2006) la Filtración Lenta en Arena (FLA) es la tecnología de tratamiento de agua más antigua usada en los sistemas de abastecimiento, empleada exitosamente en el norte de Europa y Norteamérica con el fin de tratar aguas superficiales con niveles relativamente bajos de contaminación, citado de (Rachwal et al, 1988; Sims y Slezak, 1991). En América Latina los elevados niveles de turbiedad en los ríos causaron taponamiento prematuro de los filtros, haciéndose necesario un frecuente mantenimiento y en última instancia el abandono de muchos de estos sistemas.

#### 4.2 FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FiME)

Según la Organización Panamericana de la Salud –OPS– (2005) la FiME puede estar conformada por dos o tres procesos de filtración, dependiendo del grado de contaminación de las fuentes de agua. Integrada por tres procesos: Filtros Gruesos Dinámicos (FGDi), Filtros Gruesos Ascendentes en Capas (FGAC) y FLA como se muestra en la Figura 2. Los dos primeros procesos constituyen la etapa de pre tratamiento, que permite reducir la concentración de sólidos suspendidos (Jaramillo, 2013).



**Figura 2.** Esquema general de una planta FiME.

Tomado de Sánchez et al. (2007).

La tecnología FiME tiene ventajas significativas, como la no utilización de químicos, equipos o materiales importados. Es un sistema que puede ser fácilmente administrado, operado y mantenido por las organizaciones comunitarias además esta combinación hace posible el tratamiento de agua con niveles de contaminación muy superiores a los que se pueden tratar utilizando sólo los FLA (Sánchez et al, 2007).

La FiME conserva las ventajas de la FLA como una tecnología robusta y confiable, que puede ser mantenida por operadores con bajos niveles de escolaridad. Es mucho más sostenible que el tratamiento químico del agua para las comunidades rurales, pequeños y medianos municipios de los países en vía desarrollo, así como para las áreas más remotas de los países industrializados. Otros procesos de tratamiento como la sedimentación, las trampas de arena y rejillas pueden preceder a los sistemas FiME (Jaramillo, 2013)

En nuestro contexto muchas de las limitaciones de los FLA han podido ser superadas con la aplicación de los sistemas FiME. A pesar de ello, continúan persistiendo limitaciones como las cortas carreras de filtración que afectan una mejor aplicación de esta tecnología, además el componente de mayor peso porcentual en costos de inversión inicial se debe a los FLA. (Fernández et al. 2001).

### **4.3 GEOTEXTILES SINTETICOS**

Un Geotextil NT es una tela permeable y flexible, formado a partir de un entrelazado de fibras o filamentos de polipropileno mezclados aleatoriamente, conformando una capa con altas propiedades de filtración y drenaje. Los Geotextiles tienen buenas características mecánicas e hidráulicas gracias a su estructura tridimensional, que permitirían su utilización no solo en obras de Ingeniería civil (protección, separación, estabilización y repavimentación de los suelos), sino también en la potabilización de agua.

En la década de los 80, se iniciaron investigaciones que involucran el uso de geotextil NT en la filtración lenta en arena, trayendo resultados satisfactorios en términos de calidad del agua filtrada, facilidad de operación y costos involucrados (De Souza, 2015). Por consiguiente algunas de las limitaciones de la tecnología FiME podrían ser superadas con la implementación de geotextiles NT.

Paterniani (1991) (citado por De Sousa, 2015) desarrolló estudios utilizando Geotextiles NT en la parte superior de la capa de arena en filtros lentos. Los resultados demostraron que el uso de los Geotextiles NT permite tasas de filtración más altas que las convencionalmente utilizadas en la filtración lenta, sin perjudicar la calidad del agua tratada; además de traer como beneficios la reducción del espesor de la capa de arena, facilitando la limpieza, mantenimiento del filtro y duración de la carrera de filtración.

Fernández et al. (2001), reporta el incremento en la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos de filtros lentos que usaron geotextiles sintéticos NT comparados con un filtro sin los geotextiles. En el estudio, los geotextiles NT presentaron porosidades entre del 87,7% y 90,7 %, con un área superficial específica entre 11.212 y 15.860 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. La eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos se incrementó del 70 al 85 % por el efecto del geotextil. Aunque este incremento del 15 % parece bajo, su efecto sobre el desarrollo de

la pérdida de carga es alto ya que la carrera de filtración se incrementó en un factor entre 1,33 a 1,92 respecto del filtro lento sin geotextil. Este resultado indica que una buena parte de los sólidos suspendidos son retenidos en este.

Los geotextiles sintéticos son fabricados en casi todo el mundo, y a nivel nacional se cuenta con una amplia gama de estos (PAVCO 2008), las diferentes características implican el grado de funcionalidad en el tratamiento de agua. Geotextiles NT con mayor superficie específica y menor porosidad normalmente presenta mayor capacidad de retención de impurezas, pero la pérdida de carga también es más notoria; mientras que geotextiles NT más porosos y con menor superficie específica presenta menor pérdida de carga, sin embargo, para mejorar la eficiencia en retención de impurezas es necesario que tengan mayor espesor, para aumentar las posibilidades de contacto entre las impurezas contenidas en el agua con las fibras del geotextil (Pádua y Di Bernardo. 1998). (Tomado de De Souza, 2015)

Estudios realizados por Mondal et al. (2007) indicaron que a mayor espesor de geotextil NT menor es el incremento inicial de la pérdida de carga, dado que no se mostró ningún aumento considerable en la pérdida de carga a lo largo del lecho durante 20 días, mientras que un lecho constituido por arena la pérdida de carga inició su incremento a partir del día 1.

Además de la reducción de la pérdida de carga, la utilización de geotextiles NT en la parte superior del lecho filtrante simplifica el proceso de limpieza de los filtros y reduce los costos relacionados con este procedimiento, el cual responde por el principal gasto en mantenimiento en la filtración con arena. Los geotextiles son fácilmente retirados, lavados y colocados en el filtro después del secado (Di Bernardo et al., 1999).

## **5. METODOLOGIA**

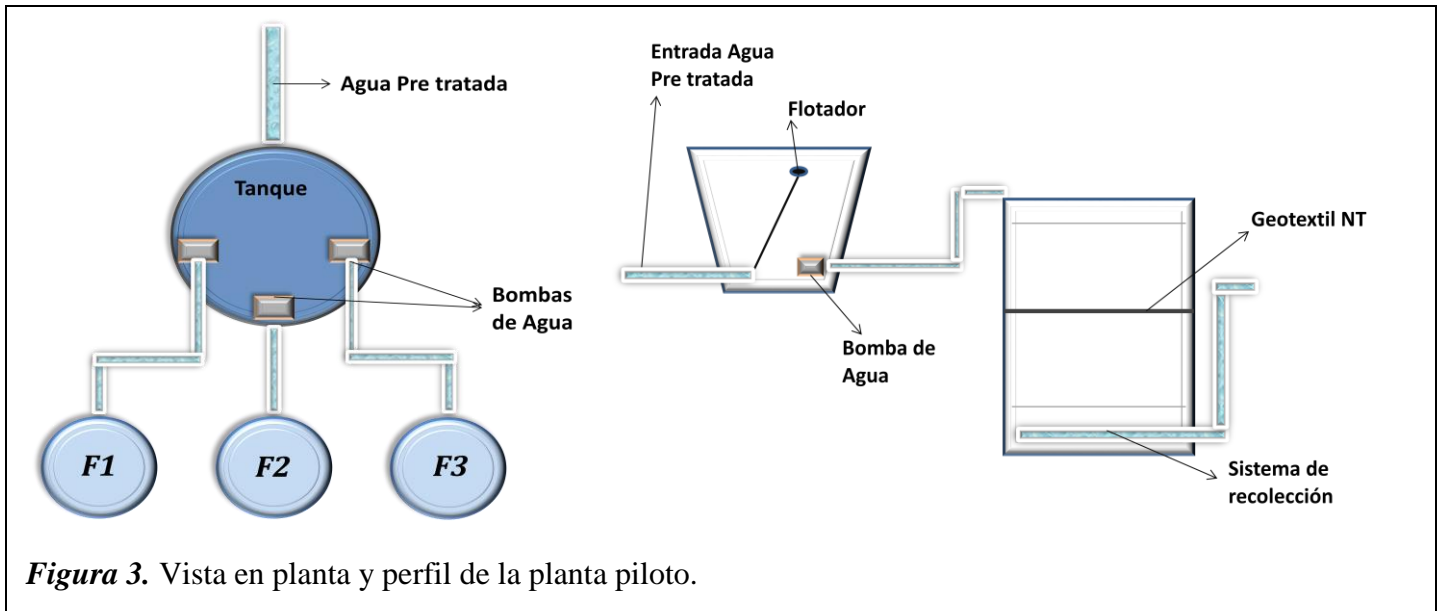
### **5.1 ZONA DE ESTUDIO**

El estudio se desarrolló a nivel de planta piloto en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca ubicada al nororiente del municipio de Popayán. El lugar de trabajo se encuentra sobre el flanco central de la cordillera Central en una franja altitudinal entre los 2.000 y 3.000 msnm, presentando un clima frío y húmedo con temperaturas promedio similares de 18,4°C, enmarcado por un periodo de lluvias más pronunciado durante los meses de noviembre y abril.

La planta piloto fue alimentada con agua pretratada proveniente de un acueducto veredal ubicado en el sector de “Los Llanos”, el cual cuenta con un sistema de tratamiento por filtración gruesa dinámica (FD) seguido de un filtro grueso ascendente (FGA) y este a su vez es abastecido por dos quebradas llamadas Velasquillo y San Isidro.

## 5.2 CONDICIONES GENERALES DE LA PLANTA PILOTO

Para desarrollar la investigación se instalaron tres filtros lentos en arena (FLA), cada FLA será abastecido por medio de una bomba de agua, cuyo afluente proviene de un tanque de abastecimiento el cual está conectado directamente a la red de distribución del acueducto veredal Los Llanos. Los caudales de entrada para cada unidad fueron controlados a través del sistema regulador incorporado en las bombas, las cuales en ningún momento utilizaron energía, tan solo como implemento para regular el caudal y para una mayor precisión se controló la diferencia de alturas en las mangueras de salida. El esquema general de la planta piloto se presenta en la Figura 3 y Foto 1.



*Figura 3.* Vista en planta y perfil de la planta piloto.

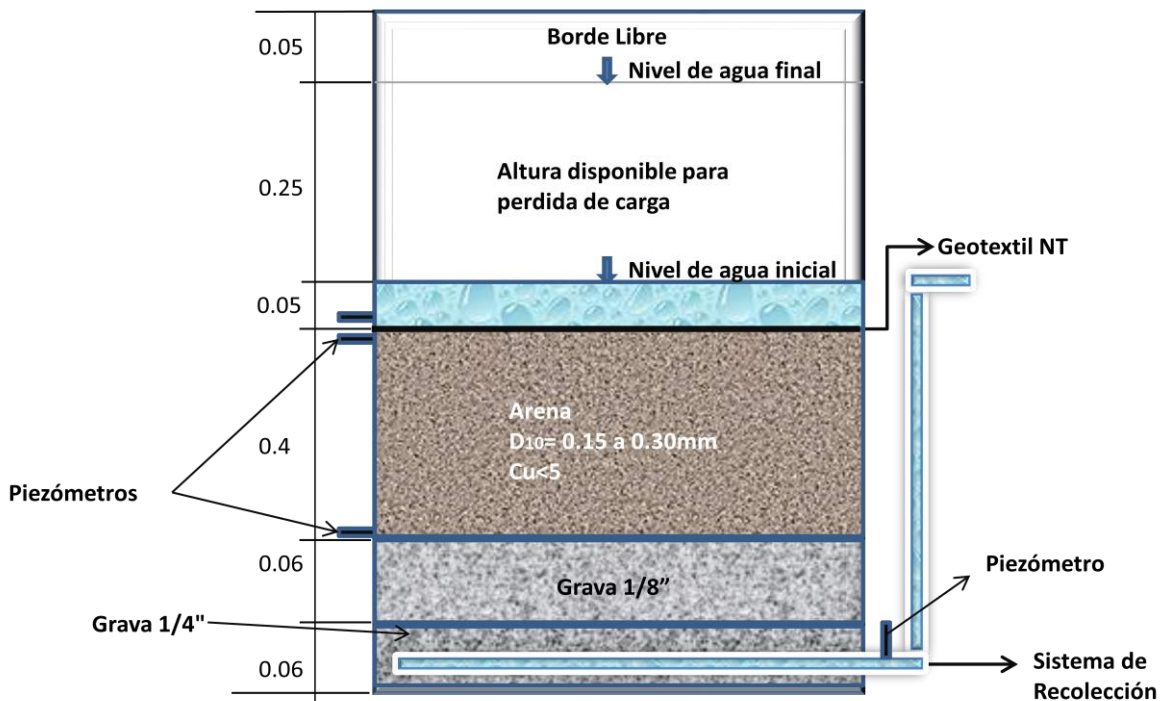
*Foto 1.* Planta piloto



### 5.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS FLA A ESCALA PILOTO

Las unidades de filtración fueron construidas utilizando bidones de plástico, con un diámetro de 0.48m y una altura de 0.87m.

Para el FLA 1 (el cual se utilizó como blanco y se evaluó con una  $V_f = 0.20$  m/h) se utilizó un lecho filtrante en arena con una altura de 0.40 m, un  $D_{10}$  entre 0.15 mm y 0.30 mm (Arboleda, 2000; Di Bernardo y Dantas, 2005; Galvis, Latorre y Visscher, 1998; Sánchez et al.2007), (Citados por Jaramillo 2013), un  $C_u < 5$  (Sánchez et al.2007) y sin geotextil. En las unidades de filtración 2 y 3 (las cuales fueron evaluadas con velocidades de filtración de 0.5 y 0.2 m/h respectivamente) se especificó un lecho en arena con las mismas características que en la primera unidad y se utilizaron además, dos capas de geotextil NT 1600 con un espesor individual de 1.5 mm para un total de 3 mm en cada unidad, conductividad hidráulica de 4.5 mm/s, una porosidad del 89.01% y un área superficial específica de 15160  $m^2/m^3$  (Pavco 2008). El geotextil fue instalado justo encima del lecho de arena, sujetado por medio de un aro de plástico (Foto 2). El lecho de soporte fue el mismo para cada uno de los FLA y estuvo compuesto por 0.06 m de grava gruesa de 1/4" y 0.06 m de grava gruesa de 1/8". La carga hidráulica inicial fue de 0.05m por encima del lecho filtrante y por último para el sistema de recolección se utilizó tubería de PVC de 1/2" de diámetro, con perforaciones de 1/8" a lo largo de la misma. En la Figura 4 se muestra el esquema del filtro lento en arena con geotextil NT a escala piloto.



**Figura 4.** Características del filtro lento a escala piloto.

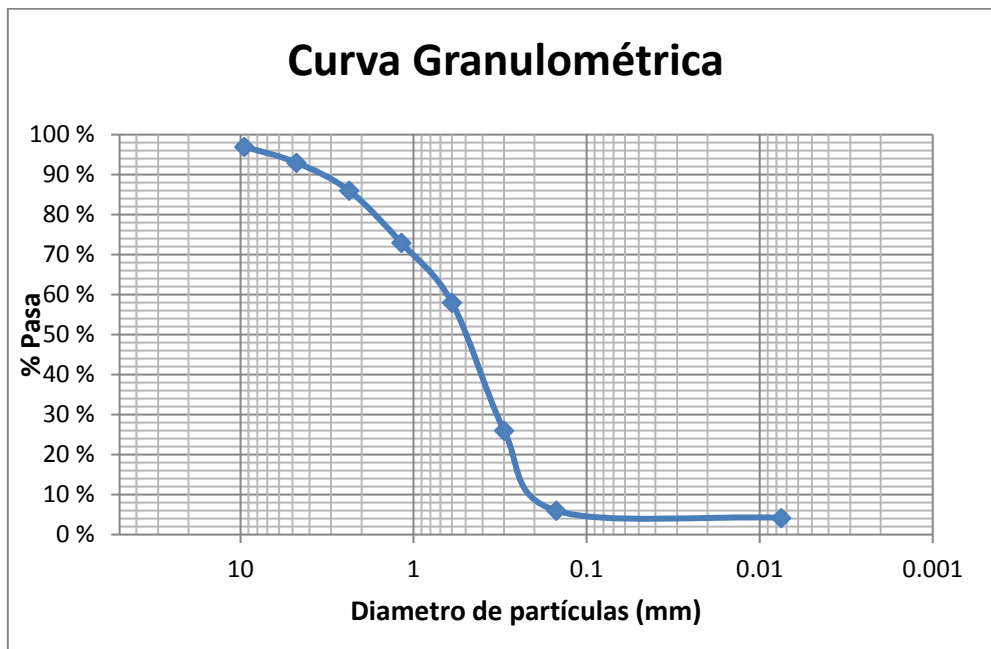


**Foto 2.** Instalación de geotextil sobre el lecho de arena por medio de aro de plástico.



#### 5.4 ESTUDIO GRANULOMÉTRICO

En la Figura 5 se puede apreciar la curva granulométrica de la arena usada en los sistemas de filtración. El lecho filtrante estuvo constituido por arena de río con un coeficiente de uniformidad (Cu) de 2.86 y  $D_{10} = 0.22$ . Ambos valores cumplen con lo reportado por (Arboleda, 2000; Di Bernardo y Dantas, 2005; Galvis, Latorre y Visscher, 1998; Sánchez et al.2007), (Citados por Jaramillo 2013) para la construcción de FLA.



**Figura 5.** Estudio granulométrico de la arena utilizada en el lecho filtrante.

De donde  $D_{10}=0,22$  mm;  $D_{30}=0,34$  mm;  $D_{60}=0,63$  mm y  $Cu= 2.86$

## 5.5 DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

### 5.5.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Valorar el impacto del uso de Geotextiles NT y la velocidad de filtración en la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua efluente en filtros lentos con velocidades de 0.2 y 0.5 m/h.

Para medir el impacto del Geotextil NT y el aumento en las velocidades de filtración en la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua se tomaron muestras por medio de muestreo puntual. Las medidas de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se hicieron a la entrada y salida de los FLA con el propósito de conocer la eficiencia del sistema. Las mediciones para coliformes fecales y totales se hicieron con una frecuencia de una vez por semana en la entrada y en la salida de cada uno de los FLA. En cuanto a la frecuencia de medición para turbiedad y color se hicieron tres veces por semana tanto en la entrada como en la salida de los filtros. Los métodos analíticos usados para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos son los presentados por el *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (APHA, 2005)*. En la Tabla 1 se puede observar cada uno de los parámetros evaluados, el método de referencia asociado según el *Standard Methods* y el equipo usado para llevar a cabo la evaluación de cada parámetro. Las pruebas fisicoquímicas se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Del Cauca. Las pruebas de coliformes fecales y totales se realizaron en el laboratorio de calidad de la facultad de Ciencias Agrarias de la misma institución.

**Tabla 1.**

*Parámetros de calidad evaluados, métodos de referencia y equipos usados en la medición de calidad microbiológica y fisicoquímica.*

Parámetros	Método de referencia	Equipos
Materia orgánica	Espectrofotométrico UV-254nm.	Espectrofotometro Merk modelo Pharo 300.
Turbiedad (UNT)	Nefelométrico 2130-B.	Turbidimetro portátil Hach modelo 2100P.
Color aparente (UPC)	Espectrofotométrico 2120-C.	Colorímetro portátil Hach modelo DR/2010.
Potencial de hidrogeno (pH)	Electrométrico 4500-H+B.	Multi-parámetro Hach HQ 40d con sonda para medir potencial de hidrogeniones.
Temperatura (°C)	Potenciométrico 2550	Multi-parámetro Hach HQ 40d con sonda para medir potencial de hidrogeniones.
Coliformes totales y fecales	Filtración por membrana 9222.	

### 5.5.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2

Evaluar el impacto del uso de Geotextiles NT y la velocidad de filtración en la pérdida de carga de los filtros lentos con velocidades de filtración de 0.2 y 0.5 m/h.

Para medir el impacto del Geotextil NT y el aumento en las velocidades de filtración sobre la pérdida de carga se utilizaron 4 piezómetros ubicados en diferentes puntos a lo largo de las paredes de cada una de las unidades de filtración. Los piezómetros estuvieron ubicados en los puntos de interés a hacer la medición de la pérdida de carga como se observa en la Tabla 2. Se consideraron las pérdidas de carga generadas por la capa de Geotextil NT, las generadas por el lecho de arena y las pérdidas totales en la salida del filtro.

**Tabla 2.**

*Localización de los piezómetros en los FLA*

Piezómetro	Localización
1	Sobre el geotextil (P1)
2	Bajo el geotextil1 (P2)
3	Bajo el lecho de arena (P3)
4	Bajo el lecho de soporte (P4)

Las pérdidas de carga se determinarán por la diferencia de niveles entre algunos de los piezómetros de la siguiente manera:

- Pérdida de carga en el Geotextil = altura piezómetro 1 – altura piezómetro 2.
- Pérdida en el lecho de arena = altura piezómetro 2 - altura piezómetro 3.
- Pérdida en el lecho de soporte = altura piezómetro 3 - altura piezómetro 4.
- Pérdida de carga total = altura piezómetro 1 - altura piezómetro 4.

En el momento de hacer las mediciones de pérdida de carga en campo se hizo un monitoreo de caudales para asegurar que fueran los correspondientes a los caudales de diseño y no hacer una lectura incorrecta en los piezómetros. En el caso de que los caudales no fueran los adecuados se proseguía a ajustarlos por medio de las bombas dosificadoras y esperar a que los niveles en los sistemas de filtración se estabilizaran. Se chequeó también que no hubiera aire en el interior de cada piezómetro, en el caso de que fuera lo contrario se procedía a sacar el aire.

La frecuencia de medición de pérdidas de carga en los filtros se realizó 4 veces por semana hasta el final de la carrera de filtración de cada FLA.

## **6. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

### **6.1. CALIDAD DEL AGUA AFLUENTE**

Durante la investigación no se midió la calidad del agua cruda, en su lugar se realizaron mediciones de la calidad del agua proveniente del acueducto veredal de los Llanos, es decir

el agua tratada por los filtros dinámicos (FD) y los filtros gruesos (FGA) que dotaban directamente los filtros lentos en arena de la planta piloto.

A pesar de este pretratamiento, en el periodo de muestreo se presentó cierta variabilidad en la calidad del agua en los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tal como se resume en la Tabla 3. Esta dispersión se atribuye a la variabilidad del clima, precipitaciones y el mantenimiento del sistema de pretratamiento; en cuanto a este último hubo periodos de tiempo con ausencia de abastecimiento de agua, uno de estos periodos imposibilitó la toma de muestras. Toda la información referente a la calidad del agua pretratada se encuentra en el Anexo 1.

**Tabla 3.**

*Parámetros Físico-Químicos y Microbiológicos del agua afluyente.*

	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>UV 254nm</b>	<b>C. Totales</b>	<b>C. Fecales</b>
<b>Media</b>	3,50	31	0,097	784	20
<b>Valor Máximo</b>	20,23	100	0,346	2020	72
<b>Valor Mínimo</b>	1,86	11	0,047	90	2
<b>Desviación estándar</b>	3,34	20,03	0,06	670,74	19,84
<b>No datos</b>	31	31	31	11	11

Estos datos son comparables a los reportados por Galvis et al. (1999) quienes reportaron valores promedio de turbiedades entre 0.8 y 6 UNT, color real entre 4 y 15 UPC/100mL, y coliformes fecales entre 50 y 1837 UFC/100mL a la entrada de los FLA en 8 sistemas de tratamiento a escala real. En cuanto a color aparente, con un promedio de 31 UPC, esta fuera del rango de color real reportado; no obstante, cabe resaltar que los valores de color aparente son mayores a los de color real, ya que para obtener el color real de una muestra se realiza la filtración de la misma, por lo tanto no presenta partículas en suspensión. Valores superiores de color aparente han sido trabajados por filtros lentos en arena, Fenga (2001), reporta medias de color aparente entre 80 y 114 uC después del sistema de pretratamiento

En general el agua pretratada presenta características fisicoquímicas compatibles con el tratamiento por filtración lenta en arena, estando dentro de los límites de turbiedad y color aparente recomendados, 10 UNT y 100 UPC respectivamente. Aunque los valores máximos sobrepasen estas recomendaciones, es aceptable siempre y cuando sea por un corto periodo de tiempo que no sobrepase dos días seguidos (HUISMAN y WOOD, 1974; CÁNEPAS, 1992; Di BERNARDO, 1993; GoNU/GoSS, 2009) (Citados por De Souza, 2015).

Algunos parámetros ya mencionados anteriormente limitan el uso de sistemas de filtración lenta, de igual manera la literatura recomienda un control de la cantidad de coliformes totales a la entrada de las unidades; algunos autores sugieren una cantidad menor a 1000

UFC/100mL (Di Bernardo y Dantas, 2005; Galvis, 1999) mientras que otros sugieren un valor por debajo de las 800 UFC/100mL (Arboleda, 2000) (Citados por Jaramillo, 2013), en ambos casos la concentración media de coliformes totales estaría por debajo de los valores recomendados.

En algunos de los muestreos se presentó gran diferencia entre la concentración de coliformes fecales y coliformes totales. Por ejemplo, en el día de muestreo número 42, la presencia de coliformes totales fue de 2020 UFC/100mL y tan solo 2 UFC/100mL de coliformes fecales, una diferencia notable, sin embargo, en la literatura se encuentran reportes similares con diferencias aún mayores. En concordancia, Fenga (2001) presentó gran variación entre la cantidad de coliformes totales y coliformes fecales en el agua cruda. La concentración media de coliformes totales en un primer ensayo fue de 4836.3 NMP/100mL y no se registraron coliformes fecales; en el ensayo número 2, la concentración media de coliformes totales fue de 1426,4 NMP/100mL y la media de coliformes fecales fue de 25.1 NMP/100mL.

Con todo lo anterior el agua afluyente presenta características semejantes a las recomendadas para el tratamiento mediante la filtración lenta en arena, además es primordial mencionar la importancia de las características del agua cruda, ya que cuando no se encuentran dentro los intervalos de valores sugeridos para la tecnología FiME, ésta no garantizaría las condiciones de potabilidad del líquido y además las impurezas del agua generarían una rápida colmatación y taponamiento de los filtros lentos, situación que se hace evidente en la duración de la carrera de filtración (Pereira et al. 2013).

## 6.2. CAUDAL MEDIDO Y VELOCIDAD DE FILTRACIÓN PROMEDIO

A lo largo de la investigación se realizó un control de los caudales entrantes para cada unidad para asegurar la confiabilidad en la lectura piezométrica. La Tabla 4 muestra un resumen de los datos tomados en campo y la totalidad de las mediciones estarán en el anexo 2.

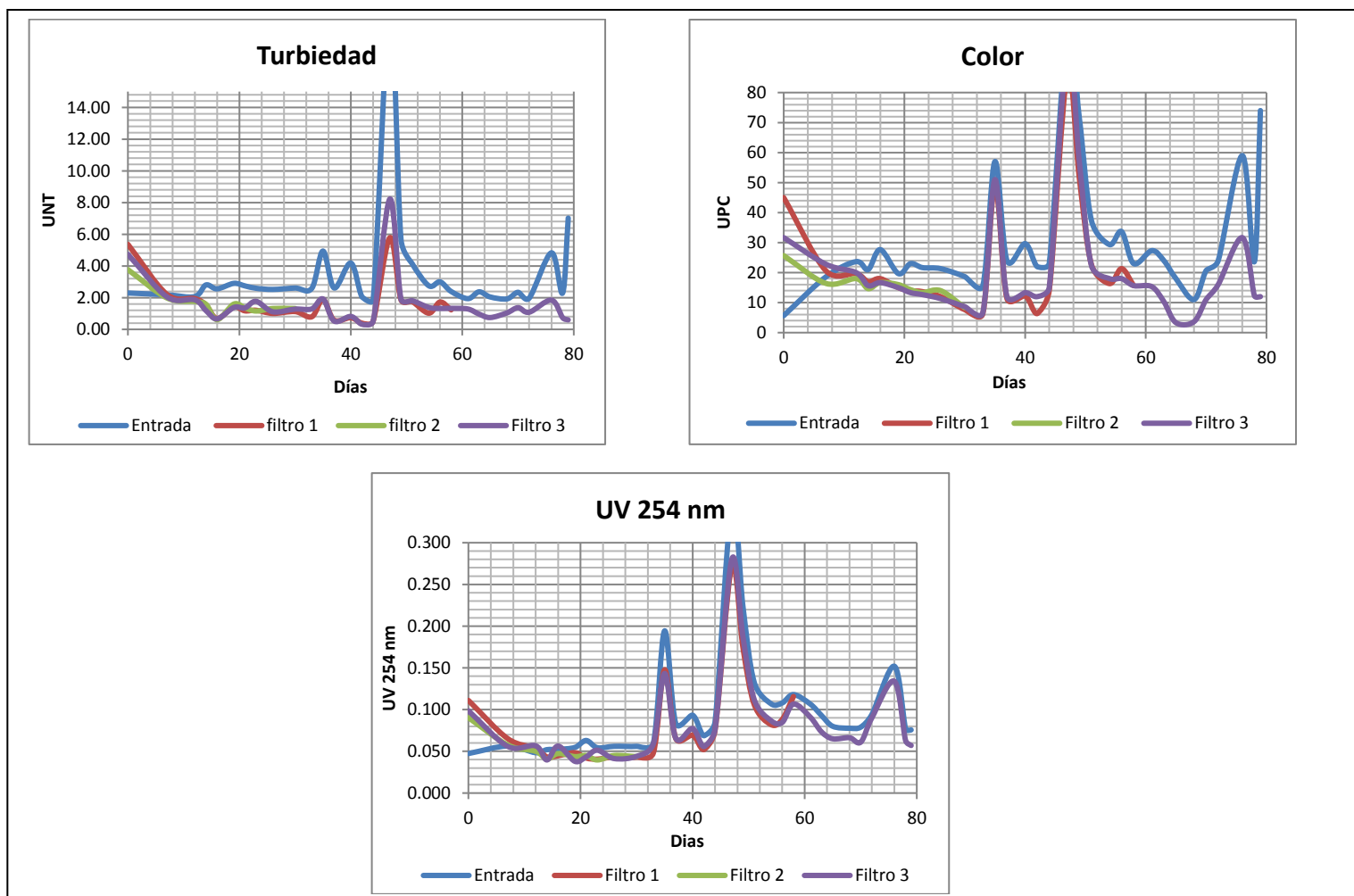
**Tabla 4.**  
*Caudales de entrada para los filtros lentos en arena.*

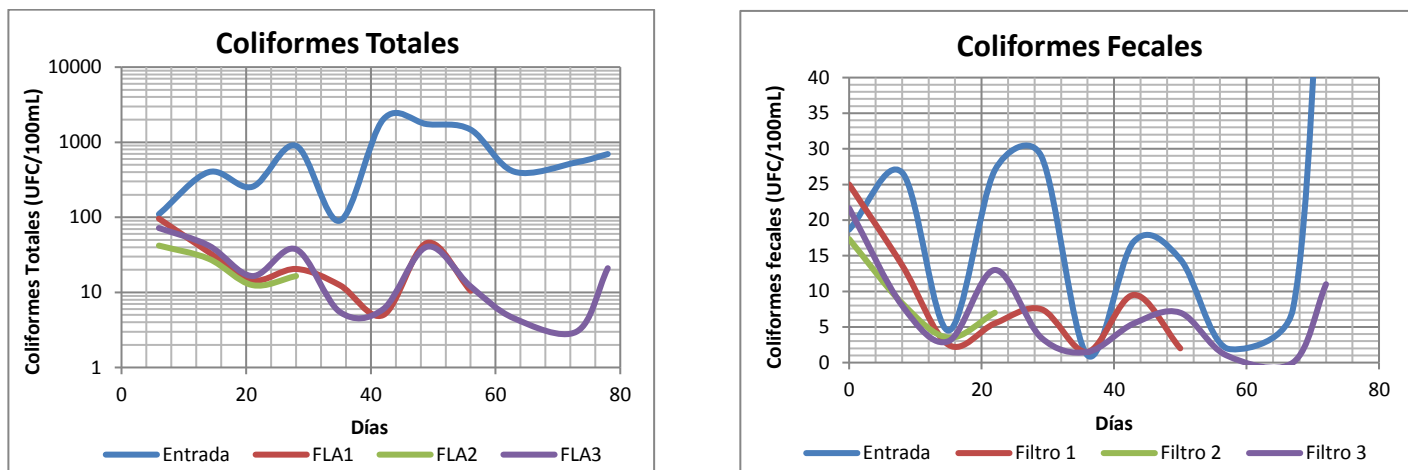
FLA	Q(mL/s)			Vfiltración(m/h)		
	1	2	3	1	2	3
<b>Promedio</b>	10.13	24.85	10.15	0.203	0.497	0.203
<b>Máximo</b>	10.62	25.33	10.53	0.2124	0.507	0.211
<b>Mínimo</b>	9.33	23.97	9.66	0.1866	0.479	0.193
<b>Desv Est</b>	0.28	0.28	0.22	0.0056	0.0057	0.0045
<b>Nº de datos</b>	35	18	46	35	18	46

A partir de la tabla 4 se infiere que los caudales y velocidades de diseño corresponden contiguamente a las experimentales; en ambos casos las desviaciones estándar confirman una mínima dispersión de los datos, puesto que esta es mucho menor que el promedio de caudal o velocidad en cada unidad, garantizando así la confiabilidad en las lecturas piezométricas.

### 6.3. EFECTO DE MADURACIÓN.

En la figura 6 se muestra que después de las primeras semanas de operación, entre los días 16 y 20 aproximadamente, hay una mejora en la remoción de parámetros como turbiedad, color aparente, UV 254nm, coliformes totales y fecales, resultados que coinciden con lo establecido por Galvis et al. (1999), quienes exponen que las unidades de filtración presentan un estado de maduración durante los primeros veinte días, en los cuales la calidad microbiológica presentó niveles altos de contaminación. Evidentemente, del estado de maduración de la capa biológica depende la eficiencia de remoción en los filtros lentos en arena.





**Figura 6.** Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua afluente y efluente a lo largo del tiempo.

Por lo presentado anteriormente, los datos previos a un estado de maduración aceptable, para la presente investigación se consideró de 16 días. Los datos medidos durante éste periodo no se considerarán en los siguientes ítems de presentación y discusión de resultados referentes a la calidad del agua tratada.

## 6.4. CALIDAD DEL AGUA TRATADA

### 6.4.1. CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL AGUA TRATADA

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los datos fisicoquímicos durante el periodo de experimentación, sin incluir el periodo de maduración. Se muestra el promedio, valor máximo, valor mínimo, la desviación estándar y el número de datos para cada parámetro medido: turbiedad, color, UV 254nm (la cual es una medida indirecta de la materia orgánica). Toda la información recopilada de los parámetros fisicoquímicos se presenta en el Anexo 1.

**Tabla 5.**

*Parámetros fisicoquímicos de entrada y salida.*

<b>TURBIEDAD</b>	<b>Entrada</b>	<b>Filtro 1 0.2m/h</b>	<b>Filtro 2 G. NT y 0.5m/h</b>	<b>Filtro 3 G. NT y 0.2m/h</b>
<b>Media</b>	3,50	1,42	1,34	1,44
<b>Valor Máximo</b>	20,23	5,79	1,77	8,23
<b>Valor Mínimo</b>	1,86	0,39	0,61	0,32
<b>Desviación estándar</b>	3,34	1,14	0,35	1,38
<b>No datos</b>	31	20	8	29
<b>COLOR</b>				

<b>Media</b>	31	22	14	19
<b>Valor Máximo</b>	100	86	18	95
<b>Valor Mínimo</b>	11	6	8	3
<b>Desviación estándar</b>	20	19	3	19
<b>No datos</b>	31	20	8	29
<b>UV 254nm</b>				
<b>Media</b>	0,097	0,083	0,044	0,083
<b>Valor Máximo</b>	0,346	0,272	0,050	0,280
<b>Valor Mínimo</b>	0,047	0,041	0,040	0,038
<b>Desviación estándar</b>	0,062	0,058	0,003	0,051
<b>No datos</b>	31	20	8	29

Comparando los diferentes parámetros fisicoquímicos analizados durante el proceso experimental, se tiene que los sistemas de filtración tuvieron una mayor eficiencia en cuanto a remoción de turbiedad, cumpliendo con lo que se estipula en la norma, a excepción de aquellos muestreos en los cuales se registró la turbiedad más alta durante el experimento y durante los primeros días (los primeros días están ausentes en la tabla por lo explicado anteriormente en el ítem 5.3). La eficiencia de remoción de color aparente y UV 254nm (medida indirecta de materia orgánica) fue sustancialmente más baja en los tres sistemas piloto, aun así la calidad del agua efluente cumplió con la norma durante la mayor parte de la fase experimental. La totalidad de las eficiencias mencionadas se pueden observar en el anexo 3.

En la Tabla 5 se aprecia que la unidad de filtración 2 ( $V_f=0,5\text{m/h}$ , con Geotextil NT) presenta mejores medias en cada uno de los tres parámetros fisicoquímicos evaluados, lo que no necesariamente refleja mayor eficiencia en este filtro. Esta leve superioridad en las medias del filtro 2 se debe en gran medida a que presentó una duración de carrera menor y durante este periodo el comportamiento de la calidad de agua de entrada fue mejor.

A continuación se presenta el análisis individual de cada parámetro de calidad tomado en campo y se realiza la comparación de los distintos sistemas piloto para comprobar la influencia de la implementación del Geotextil NT 1600 y el aumento de velocidad a  $0.5\text{m/h}$  en la calidad del efluente.

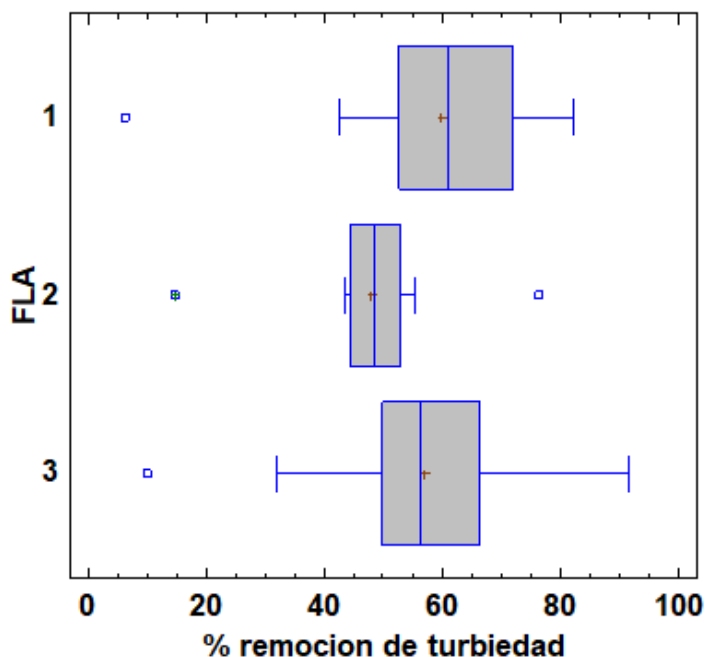
## **TURBIEDAD**

En la Tabla 5 se aprecia que el filtro 2 presentó un menor promedio de turbiedad en el agua tratada, sin embargo, después de su finalización de carrera se presentaron mayores valores de turbiedad en el agua afluente y los valores a la salida de los filtros 1 y 3 permanecieron relativamente constantes, por lo que las eficiencias de remoción aumentaron. Por esta razón fue el FLA 1 quien mantuvo una mejor remoción, con un promedio del 59.9% su porcentaje



de remoción fue un 2.9% mayor que el FLA 3 (el cual obtuvo un porcentaje del 57%) y un 12.1% mayor que el FLA 2 (el cual fue del 47.8%). En este caso se puede notar levemente que a medida que las tasas de filtración aumentan, la eficiencia de remoción disminuye, tal y como lo plantea Jaramillo (2013).

En la figura 7 se muestra como es la variación entre las diferentes unidades de filtración. La tendencia de la línea de mediana en las unidades 1 y 2 es hacia la derecha lo que indica una mayor cantidad de datos por encima del valor de la media, caso contrario en la tercera unidad, en la cual la línea de la mediana esta hacia la izquierda de la media de los datos; también se pueda apreciar que el FLA 1 presenta una ligera tendencia de la mediana hacia un mayor porcentaje de remoción.



**Figura 7.** Dispersión de los datos de remoción de turbiedad para cada FLA.

A pesar de lo anterior, si comparamos las tres unidades de filtración mediante análisis de varianza se puede decir que no hay diferencia estadísticamente significativa ( $P=0.96$ ;  $\alpha=0.05$ ), lo que indica que tanto una mayor velocidad de filtración como el uso de geotextil no afecta la calidad del agua efluente en cuanto a turbiedad.

En concordancia, Fenga & Paterniani (2002) obtuvieron calidad muy semejante con tasas de filtración de  $3\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$  y  $9\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$ , en torno a 4.0 UNT; con una tasa de  $6\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$ , la turbidez media del efluente permaneció alrededor de 6.8 UNT. Estos resultados le permitieron concluir que el aumento de la tasa de filtración provocó poca alteración en la calidad de los efluentes y que estas fueron consecuencia de la calidad del agua cruda. Ellos

subrayan también que los ensayos realizados con tasas de filtración de 3m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>día y 9m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>día fueron realizados en meses donde la temperatura fue más elevada, lo que proporciona un ambiente más favorable para los microorganismos que forman la “Schmutzdecke” (capa biológica), la cual es la gran responsable por la mejoría de la calidad del agua conforme avanza la filtración, mientras que los ensayos realizados con tasas de filtración de 6m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>día fueron realizados en meses más fríos.

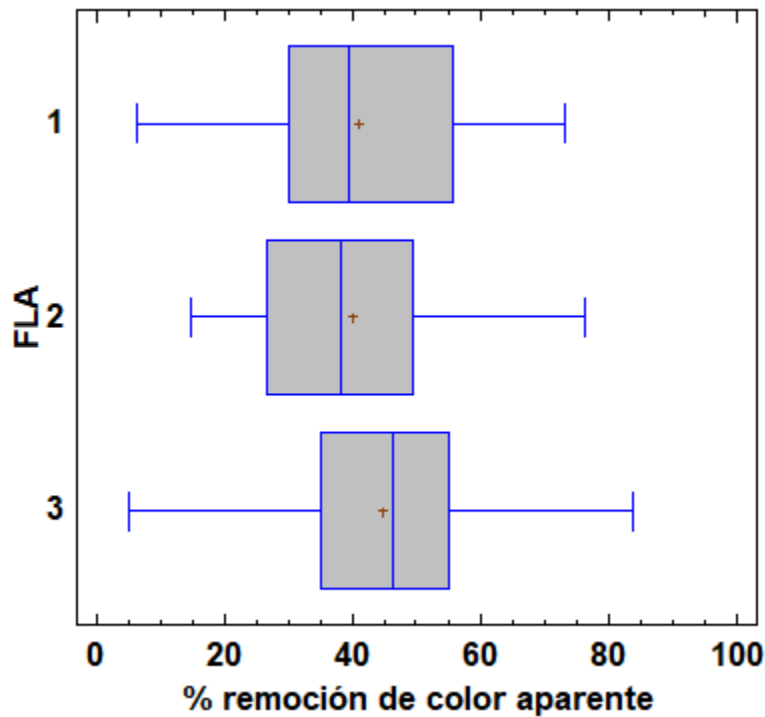
Cabe resaltar que el porcentaje de remoción máximo lo obtuvo el sistema de filtración 3 con un 91.45%, esta remoción se obtuvo en el último día de muestreo y operación de la unidad, lo que podría indicar que la eficiencia pudo arrojar valores iguales o más altos en días siguientes, sin embargo esta afirmación no se pudo corroborar debido a la finalización de la carrera de filtración.

Galvis et al. (1999) reportan turbiedades medias entre 2.0 y 5.5 UNT a la salida de los FLA en unidades a escala técnica de investigación y rangos de turbiedad media entre 0.4 y 1.0 UNT a escala real con velocidades de filtración menores a las utilizadas en la presente investigación. La turbiedad del agua tratada a la salida de los filtros 1, 2 y 3 alcanzaron un valor promedio de 1.42, 1.34 y 1.44 UNT respectivamente. Existe una ligera diferencia con las turbiedades a escala real reportadas por Galvis et al., al parecer podría deberse a las más bajas velocidad de filtración implementadas, a pesar de ello, se cumplió con la normatividad vigente colombiana para calidad de agua potable, la cual indica que el valor para turbiedad no debe ser superior a 2 UNT.

## **COLOR**

Las remociones promedio de color aparente fueron de 38.1, 34.8, y 42.5% para las unidades 1, 2 y 3 respectivamente. En contraste Fernández et al. (2001) reporta remociones de color real entre 51% y 72% a escala piloto, trabajando con velocidades de 0.15m/h. Esta diferencia puede ser explicada por la diferencia de velocidades de filtración, que para esta investigación fueron hasta de 0.5m/h.

La capacidad de remoción de color aparente de las tres unidades experimentales se presenta en la figura 8, y fluctuó de gran manera, de tal modo que una gran fracción de los datos tomados no cumplen con la norma colombiana, la cual reglamenta un máximo de color aparente de 15 UPC. El color aparente proveniente del efluente de las tres unidades de filtración fluctuó dependiendo de la calidad del agua afluente, es decir, que es necesario un adecuado sistema de pretratamiento que garantice un nivel de color óptimo para cumplir con el objetivo final de los FLA. La remoción en las unidades 1, 2 y 3 fue baja, puesto que el 50%, 37.5% y 41.4% de los datos no cumplen con la normatividad colombiana, mientras que en turbiedad el porcentaje de muestras que no alcanzaron el objetivo de calidad fueron 5%, 0% y 3.45% respectivamente, siendo una diferencia bastante notable.



**Figura 8.** Dispersión de los datos de remoción de color aparente para cada sistema FLA.

Después de haberse realizado una comparación estadística de análisis de varianza entre las diferentes unidades de filtración se obtuvo que no hay una diferencia significativa en cuanto a remoción de color entre los tres sistemas ( $P = 0.63$ ), con una confiabilidad del 95%, resultados similares a los obtenidos por Hoyos & Méndez (2017), los cuales señalan que la presencia de geotextil y las diferentes velocidades de filtración utilizadas no tuvieron influencia sobre la eficiencia de las unidades de filtración en cuanto a la remoción de color.

En contraste, Fenga & Paterniani (2002) señalan que para el parámetro de color aparente, los efluentes con tasas de filtración de 0,25m/h y 0,375m/h presentaron calidad semejante girando en torno a 68.0 uC y 60.0 uC respectivamente, mientras que los ensayos realizados con una tasa de filtración de 0,125 m/h fueron los que presentaron efluentes con mejor calidad alrededor de 46.3 uC, por lo tanto el aumento de la tasa de filtración provocó alteraciones en la calidad del efluente, aunque reportaron que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las tres velocidades evaluadas.

Caso similar reporta Pereira et al. (2013), quien hace una comparación entre el uso de geotextil, carbón activado y arena comprobando que el geotextil tuvo una mayor capacidad de remoción de color. El mejor desempeño lo evidenciaron los filtros lentos con geotextil, que removieron hasta 86uH, seguidos del Filtro Lento con carbón activado y del Filtro lento con arena que removió en promedio 75uH; sin embargo, el efluente presentó valores

por encima de las 15uH, superando así al límite recomendado por la norma brasileña para agua potable.

## MATERIA ORGÁNICA

El monitoreo de contenido de materia orgánica se hizo por medio de espectrofotometría UV a una longitud de onda de 254nm, debido a que muchas sustancias orgánicas absorben la luz en este valor de longitud de onda. La cantidad de luz absorbida se utiliza para hacer una medición indirecta del contenido de materia orgánica natural, por consiguiente no se puede hacer uso de estos resultados directamente para concluir si hay o no cumplimiento de la normatividad para calidad de agua potable.

Aráuz y Castillo (2008) reportan resultados que muestran remoción de COT y UV 254nm como indicadores de materia orgánica. Los valores promedio reportados en su investigación se pueden observar en la Tabla 6, los cuales están entre rangos muy similares a los reportados en la presente investigación (ver Tabla 5).

**Tabla 6.**

*Valores de comparación entre COT y UV 254 nm encontrados en la literatura.*

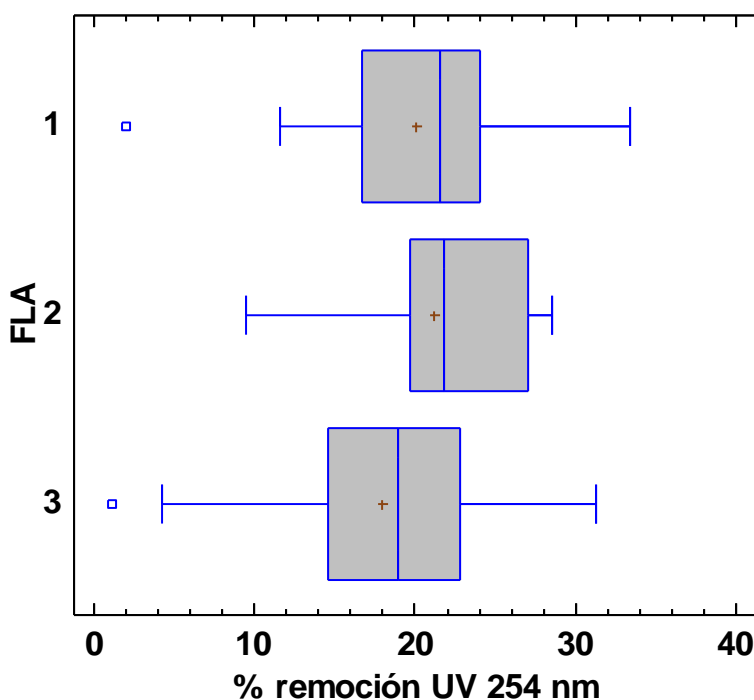
Tipo de muestra	Valores promedio de COT (mg/L)	Valores promedio de UV 254 nm	Autor
Agua sintética afluyente	2.48	0.34	Aráuz y Castillo (2008)
Agua sintética efluente	1.68	0.019	Aráuz y Castillo (2008)
Agua de río afluyente	2.57	0.083	Aráuz y Castillo (2008)
Agua de río efluente	0.90	0.050	Aráuz y Castillo (2008)
Efluente de estudio	11 + 0.9	0.194 + 0.005	Muñoz & Orta (2012)

En concordancia con los resultados y la información proporcionada por ambas investigaciones se puede decir que probablemente los resultados obtenidos para color aparente estén por debajo de 5 mg/l de COT, el cual es el valor máximo permitido para este parámetro propuesto en la resolución 2115 del 2007, cumpliendo así en promedio con el estándar de cantidad de materia orgánica para asegurar una buena calidad de agua potable en Colombia. Reportes realizados por Muñoz & Orta (2012), en los que se muestran altos valores de COT, igualmente mostrados en la Tabla 6, para un efluente que ha sido tratado con ozono permiten respaldar lo mencionado anteriormente y llegar a la premisa de que en los días en que se presentaron los más altos valores registrados, los cuales coinciden con los registros de alta turbiedad y color, la materia orgánica pudo haber alcanzado valores superiores a los que estipula la norma.

Para la unidad de filtración 1 el promedio de la remoción del valor de la absorción de UV a 254nm es del 18.53% mientras que para las unidades 2 y 3 fue de 18.16% y 15.88% respectivamente. Se puede apreciar que el FLA 1, obtuvo una eficiencia ligeramente mayor,

pero al igual que en los demás parámetros medidos no hay una diferencia estadística significativa con los demás sistemas ( $P=0.16$ ).

En la figura 9 se puede observar la dispersión de los datos, en los tres sistemas más del 50% están por encima de la media, además se puede notar también como la unidad de filtración 1 tiende a tener un mayor porcentaje de remoción de materia orgánica, sin embargo la tendencia de todos los FLA es a tener valores de remoción con muy poca variación entre sí, razón por el aumento de la velocidad y la implementación del Geotextil NT 1600 no repercute en el porcentaje de remoción de este parámetro. Los resultados presentados tienen discrepancia con el estudio realizado por Jaramillo (2013), en el cual se manifiesta que a una menor tasa de filtración se obtienen mejores resultados, no obstante, las diferencias de remoción que se obtuvieron entre los diferentes sistemas planteados en su investigación no son estadísticamente significativas.



**Figura 9.** Dispersión de los datos de remoción de UV 254nm para cada sistema FLA

### **PH Y TEMPERATURA**

La variación para pH y temperatura no tuvo grandes oscilaciones y se mantuvo entre rangos muy pequeños, en la Tabla 7 se puede observar que los valores máximos y mínimos no se encuentran muy distantes entre sí. Los valores promedio nos indican que el agua mantuvo un pH neutro durante todo el tiempo de operación. Las diferentes tasas de filtración y el uso de geotextiles tampoco influyen en el comportamiento de este parámetro, presentando efluentes que cumplen con la resolución 2115 del 2017 al estar entre el rango de 6.5 y 9 unidades de pH. La totalidad de los datos se muestran en el anexo 1.

**Tabla 7.***Valores de pH y temperatura a la entrada y salida.*

<b>pH</b>	<b>Entrada</b>	<b>Filtro 1</b>	<b>Filtro 2</b>	<b>Filtro 3</b>
<b>Media</b>	7,28	7,26	7,19	7,15
<b>Valor Máximo</b>	7,70	7,57	7,35	7,60
<b>Valor Mínimo</b>	7,04	7,07	7,10	6,92
<b>Desviación estándar</b>	0,16	0,14	0,08	0,15
<b>No datos</b>	31	20	8	29
<b>TEMPERATURA</b>	<b>Entrada</b>	<b>Filtro 1</b>	<b>Filtro 2</b>	<b>Filtro 3</b>
<b>Media</b>	21,41	21,51	20,91	21,79
<b>Valor Máximo</b>	23,80	23,70	24,90	24,20
<b>Valor Mínimo</b>	17,70	17,40	16,80	17,00
<b>Desviación estándar</b>	1,46	1,56	2,46	1,39
<b>No datos</b>	31	20	8	29

#### **6.4.2. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA TRATADA**

##### **Coliformes Totales**

Durante el proceso investigativo se presentaron periodos de tiempo relativamente largos, de aproximadamente tres semanas, en los cuales las concentraciones de coliformes totales a la entrada fueron mayores a 1000 UFC/100 ml, recomendadas por Di Bernardo y Dantas, (2005); Galvis et al, (1999), sin embargo este periodo no alteró sustancialmente las remociones de los filtros 1 y 3 (la carrera de filtración del filtro 2 ya había terminado en estas instancias); se cree que al tener una capa biológica con más de 40 días de funcionamiento, esta estaba consolidada y por tanto las remociones de los sistemas no bajaron del 97% después de dicha maduración de la capa biológica.

En la tabla 8 se resumen de los muestreos y porcentajes de remoción para coliformes totales, en la cual se omiten las mediciones de la primera semana, por razones explicadas en el ítem 5.3. (No se omitieron datos desde el día 16, dado que la cantidad de datos para el filtro 2 se vería reducida drásticamente, además los tres sistemas ya alcanzaban eficiencias mayores al 89% desde la segunda semana).

**Tabla 8.***Concentraciones de coliformes totales y eficiencias de remoción.*

	Coliformes Totales			
	Entrada	Filtro 1 0.2m/h	Filtro 2 G. NT y 0.5m/h	Filtro 3 G. NT y 0.2m/h
Media (UFC/100mL)	784	20	19	19
Valor Máximo (UFC/100mL)	2020	46	28	42
Valor Mínimo (UFC/100mL)	90	5	13	3
Desviación estándar	670,7	14,5	8,0	15,7
%Remoción Media	-	95,1	95,4	96,5
Reducción Logarítmica	-	1,6	1,6	1,6
No datos	11	7	3	10

En la Tabla 8 se aprecia que tanto los valores de concentración, remoción media y reducción logarítmica para los tres sistemas experimentales tienen valores muy similares, hecho que es respaldado por el análisis de varianza, que ratifico que los tres filtros no presentaron diferencias significativas ( $P=0.97$ ;  $\alpha=0.05$ ), por lo tanto, la acción del geotextil NT y el aumento de la velocidad no afecta la eficiencia de remoción de coliformes totales en la filtración lenta en arena.

Resultados similares a los obtenidos por Fenga & Paterniani (2002), quienes reportan porcentajes de remoción media del orden de 89%, independientemente de la tasa de filtración utilizada (3, 6 y 9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día).

En cuanto a los porcentajes de remoción, Paterniani y Conceição (2004) (Citados por De Souza, 2015), alcanzaron niveles de remoción máxima de coliformes totales del agua cruda del 99,9%, por el tratamiento por filtración lenta en arena más geotextiles NT, con tasa de filtración entre 2 y 4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día (0.08 y 0.16 m/h). Es preciso destacar, que incluso con una tasa de filtración mucho mayor, de 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día (0.5 m/h), el FLA2 alcanzó remociones máximas del 98,2% y posiblemente la corta duración de carrera evito conseguir porcentajes mayores o similares a los del filtro 1 (99.8%), filtro 3 (99.7%) o a los presentados por estos dos autores.

The National Environmental Services Center (2009) reporta que la capacidad de eliminación de coliformes en filtros lentos en arena está entre 1 y 3 unidades logarítmicas, por lo que las tres unidades de filtración obtuvieron una reducción logarítmica dentro del rango reportado.

La totalidad de los datos microbiológicos muestreados y sus remociones se encuentran disponibles en el anexo 4.

## Coliformes Fecales.

Los resultados evidencian que la remoción media de coliformes totales fue mucho mayor que la remoción media de coliformes fecales en los tres sistemas evaluados. En gran medida esta diferencia de remociones se debe a la disimilitud de concentraciones que estos dos parámetros pueden alcanzar en el agua pretratada; tal y como se mencionó en el ítem 5.1.

Los resultados a lo largo de la investigación para coliformes fecales se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Concentraciones de coliformes fecales y eficiencias de remoción.*

	Coliformes Fecales			
	Entrada	Filtro 1 0.2m/h	Filtro 2 G. NT y 0.5m/h	Filtro 3 G. NT y 0.2m/h
Media (UFC/100mL)	20	6	6	5
Valor Máximo (UFC/100mL)	72	14	8	13
Valor Mínimo (UFC/100mL)	2	2	4	0
Desviación estándar	19,8	4,5	2,5	4,4
%Remoción Media	-	53,9	55,0	59,7
Reducción Logarítmica		0,5	0,5	0,6
No datos	11	7	3	10

En la tabla 9 se puede observar que la concentración media de los filtros 1 y 2 fue de 6 UFC/100mL y una concentración de 5 UFC/100mL para el filtro 3, con un rango que abarca los 3 filtros entre 0 y 14 UFC/100mL; después de realizado un análisis de varianza no se presentaron diferencias significativas ( $P=0.92$ ;  $\alpha=0.05$ ), por consiguiente, la implementación de Geotextil NT 1600 y el aumento de la tasa de filtración no repercute en este parámetro. Resultados afines a los obtenidos por Fernández et al (2001), quienes reportan que en general todos los FLA presentaron coliformes fecales, que estuvieron entre el rango de 0 y 36 UFC/100mL, con promedios entre 3 y 7 UFC/100mL.

Según Bellamy, Hendricks y Logsdon (1985) (Tomado de Jaramillo, 2013) puede esperarse que los filtros lentos que tratan aguas con bajo contenido de nutrientes presenten una remoción de coliformes fecales del orden de 2log o del 99,0%, después de producirse la maduración de la película biológica. En la presente investigación se obtuvieron reducciones logarítmicas y porcentajes de remociones más bajos, lo que se puede atribuir a la baja concentración de coliformes fecales a la entrada del sistema. En otros términos, la eficiencia de remoción fue mayor cuando la cantidad de estos microorganismos en el agua



cruda también estuvo alta, indicando que estos microorganismos contribuyen positivamente al enriquecimiento de la capa biológica. (De Souza, 2015)

De igual forma Barret (1989), Bellamy, Hendricks y Logsdon (1985), Bryck (1987) (Tomado de Jaramillo, 2013) afirman que el contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda; el límite máximo de desarrollo de la capa biológica se relaciona con el contenido de nutrientes en el agua cruda siendo este factor un limitante para el establecimiento de la capa biológica y así de los procesos de depredación y oxidación. Asimismo, el tratamiento es afectado negativamente por las bajas temperaturas (menores a 4°C) y los bajos niveles de oxígeno disuelto. Además, la presencia de tóxicos como plaguicidas o agroquímicos presentes en las aguas puede afectar de forma negativa a la capa biológica (Sánchez *et al.* 2007).

A pesar de las bajas eficiencias promedio, es sugerente el comportamiento del filtro 3, que precisamente contaba con capa de geotextil y una velocidad en un rango recomendado, puesto que únicamente este filtro alcanzó las cero UFC/100mL.

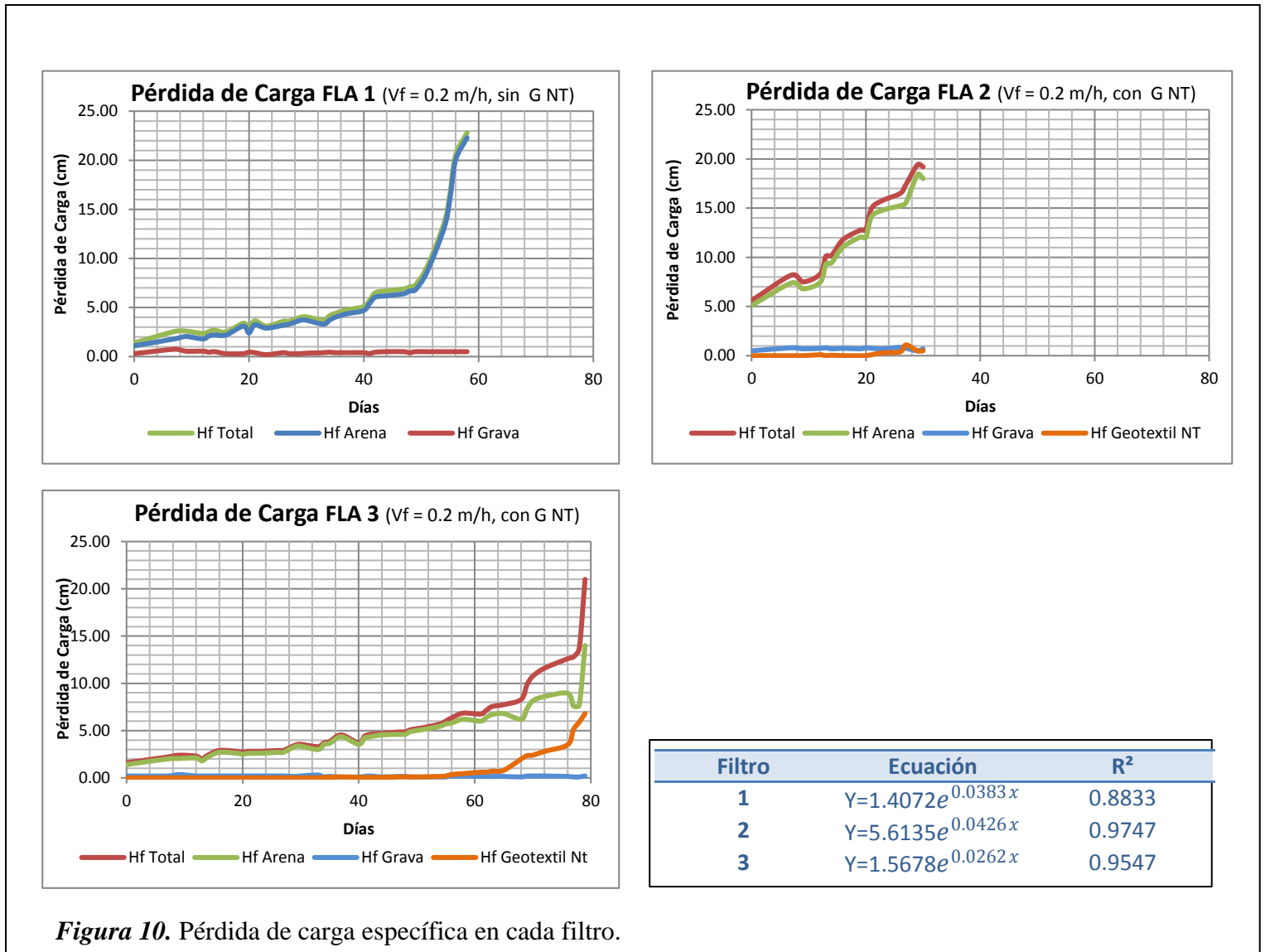
Por lo regular, la eficiencia de remoción de los microorganismos aumenta con el tiempo de funcionamiento de los filtros. La remoción de coliformes totales y fecales, en los primeros días de operación, fue baja y esta aumentó conforme al progreso del periodo de filtración. Esto puede ser explicado por la maduración de la capa biológica, acto que proporciona un ambiente favorable para la proliferación de organismos que mejoran la calidad del agua.

Según Sánchez *et al.* (2007), las poblaciones microbiológicas tales como algas, bacterias y protozoarios y las condiciones ambientales como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la radiación solar, deben ser entendidas como un sistema, ya que todos estos factores afectan el desempeño de los filtros, el proceso de maduración y la eficiencia del tratamiento.

En general se presentaron semejanzas con lo reportado por Flavia (2015), quién establece que para las tres tasas de filtración evaluadas (3, 6 y 9m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día), los niveles de remoción de turbidez, color aparente, bacterias heterotróficas, coliformes totales y E. coli por los espesores de geotextil óptimos fueron similares a los niveles de remoción alcanzados por el filtro lento de arena. Por lo tanto el aumento de la velocidad de filtración no afecta la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua tratada, lo que posibilitaría la disminución de las áreas de filtración y por consiguiente un costo económico menor. La viabilidad para trabajar a una tasa de filtración mayor ya dependerá de su comportamiento en el desarrollo de la pérdida de carga-

## 6.5. COMPORTAMIENTO DE LA PÉRDIDA DE CARGA

En la Figura 10 se evidencia la pérdida de carga total, en la arena, en el geotextil y en la grava de los FLA 1, 2 y 3, donde se puede apreciar el comportamiento exponencial de las tres unidades de filtración. Evaluaciones a nivel piloto y en proyectos construidos a escala real, realizados por Cinara, igualmente muestran un comportamiento exponencial en la pérdida de carga de un FLA. Galvis et al. (1999).



**Figura 10.** Pérdida de carga específica en cada filtro.

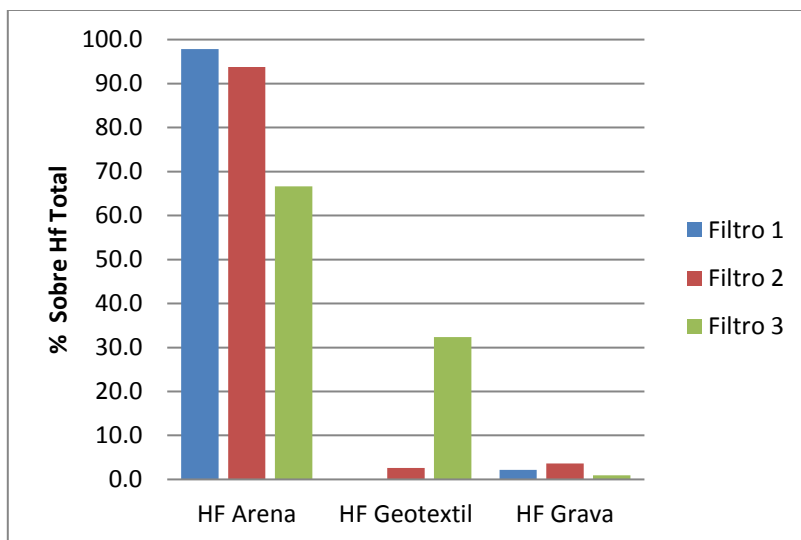
Debido a este comportamiento exponencial, es interesante resaltar que al trabajar con las velocidades recomendadas, se observa en la figura 10 que gran parte de la altura para desarrollo de pérdida de carga se consume en los últimos días de operación del filtro. El filtro 1 ( $V_f = 0.2$  m/h, sin geotextil) alcanzó el 40% de la altura disponible para pérdida de carga en un 88% (51 días) del tiempo de duración de carrera; así mismo el filtro 3 ( $V_f = 0.2$  m/h, con geotextil) alcanzó el 47% de la altura para desarrollo de pérdida de carga en un

87% (69 días) del tiempo de operación. Por lo tanto el 60% y 53% de la altura restante, es consumida en solo el 12% y 13% del tiempo total de carrera, esta observación es de suma importancia en términos económicos, ya que se podría reducir en gran medida la altura de los filtros lentos y su duración de carrera se vería mínimamente afectada.

Caso similar reportado por Galvis et al, (1999), quien muestra que al alcanzar el 85% de la carrera de filtración solo se ha desarrollado una pérdida de carga del 45%. En contraste el 55% remanente de pérdida de carga fue alcanzado en solo el 15% final de carrera.

En la Figura 10 también se aprecia que el punto de inicio de la curva de pérdida de carga total para el filtro 2 está por encima del punto inicial de las curvas de pérdida de carga de los filtros 1 y 3; mientras los filtros 1 y 3, que trabajaron con velocidades de filtración de 0.2 m/h, tuvieron una pérdida de carga inicial de 1.4 cm y 1.6 cm respectivamente (al parecer el geotextil NT no influye en el aumento de pérdida de carga inicial), el filtro 2 ( $V_f = 0.5$  m/h, con geotextil) inicio con una pérdida de carga total de 5.6 cm, esta gran diferencia se debe exclusivamente al incremento de la velocidad de filtración, hecho absolutamente razonable, puesto que a una mayor velocidad hay un aumento proporcional de la pérdida de carga lo que repercutió en la duración de la carrera de filtración del filtro 2.

A pesar del uso de geotextil NT en los filtros 2 y 3, todos los sistemas concentraron el mayor porcentaje de pérdida de carga en el lecho filtrante de arena, por lo que sigue existiendo un trasvase de lodos. A continuación, se muestran los porcentajes de pérdida por arena, geotextil y material de soporte en el último día de funcionamiento de cada unidad estudiada.



**Figura 11.** Porcentajes de pérdida por arena, geotextil y material de soporte para cada filtro en el último día de funcionamiento.

En la figura 11 se observa que únicamente el filtro 3 presentó una pérdida de carga por geotextil significativa, aunque esta pérdida fue baja en el periodo inicial, al transcurrir el proceso de filtración alcanza valores superiores a 1cm, a diferencia del filtro 2 que terminó con una pérdida por geotextil de 0.5cm. Al parecer una velocidad más alta tiene un menor efecto sobre la pérdida en el geotextil, que podría deberse a la corta duración de carrera que el filtro 2 presentó, o al hecho que las mayores velocidades generarían una filtración más de profundidad que de superficie.

La pérdida de carga por geotextil en el FLA3 comenzó a incrementarse a partir del día 54 y al final del periodo de filtración llegó a valores de 6.8cm (32%), lo que contribuyó sustancialmente en la pérdida de carga total y en la finalización de la carrera de filtración de este sistema. La Tabla 10 muestra las duraciones de carrera y factores de aumento de cada uno de los filtros lentos en arena.

**Tabla 10.**  
*Duraciones de Carrera de Filtración.*

	Duración de Carrera de Filtración (Días)		Factor de aumento
<b>Velocidad de filtración (m/h)</b>	<b>0.2</b>	<b>0.5</b>	
<b>Filtro 1 (Sin Geotextil)</b>	58	-	1
<b>Filtro 2 (Con Geotextil)</b>	-	30	0,52
<b>Filtro 3 (Con Geotextil)</b>	79	-	1,36

Fernández et al. (2001) reportan duraciones de carrera de un filtro lento en arena a escala piloto de 55 días y para filtros lentos en arena con geotextil NT 2000 y NT 1400 de 94 y 72 días respectivamente, con velocidades de filtración de 0.15 m/h. Estas duraciones de carrera son similares a las alcanzadas por los filtros 1 y 3 que trabajaron con una velocidad incluso mayor.

Tanto en la Figura 10 como en la Tabla 10 se puede apreciar la corta duración de carrera del FLA2; la implementación de una velocidad de 0.5m/h, la cual está por fuera del rango (0.1 - 0.3 m/h) recomendado por Galvis et al. (1999), provocó un decremento de 28 y 49 días en la carrera de filtración en comparación con el FLA1 y FLA3 respectivamente.

La implementación de geotextil NT sobre el filtro 3 tuvo una repercusión positiva en la duración de carrera. Teniendo en cuenta que el filtro 1 trabajó con la misma velocidad y no contaba con geotextil, la menor duración de carrera de este filtro corresponde a que la arena tiene una menor porosidad con respecto a la del geotextil NT, para este sintético se reporta mayor al 90% y esta gran porosidad evita las obstrucciones significativas en el lecho filtrante en la mayor parte de la carrera de filtración (Fernández, Escobar y Peña, 2010).

El filtro 1 comienza a incrementar la pérdida de carga de manera acelerada a partir del día 47, es llamativo que en este día se presentaron los valores máximos de turbiedad, color y UV 254nm en el agua pretratada (ver máximos en Tabla 3 y Figura 6), que posiblemente ocasionó mayor obstrucción del lecho filtrante y es aquí cuando la pérdida de carga entra en su etapa final, es decir, cuando su comportamiento exponencial se hace más evidente, apreciable en la figura 10. Por el contrario, en este mismo punto el filtro 3 no tuvo gran afectación por las impurezas del agua pretratada, posiblemente el geotextil NT actúa como una primera “barrera” donde se queda retenido gran parte del material coloidal y permite que los intersticios del lecho filtrante permanezcan libres por más tiempo para la filtración del agua, (Jaramillo, 2013) por lo que el comportamiento de la pérdida de carga mantuvo el crecimiento que presentaba en días anteriores y su punto de quiebre se presentó mucho tiempo después.

Di Bernardo (1991) (Citado por Jaramillo, 2013) reporta que por las propiedades de filtración y su gran porosidad, los geotextiles NT tienen gran capacidad de almacenamiento de lodos por lo que la capa de arena recibe menos cantidad de partículas, tal como se muestra en la Tabla 11, posibilitando que el filtro 3 tenga una carrera de filtración 21 días más larga con relación al filtro 1.

**Tabla 11.**  
*Porcentaje de lodo en la arena post filtración.*

	%Lodo		
	Capa superficial	Capa intermedia	Capa baja
<b>Filtro 1 (Sin Geotextil, 0.2m/h)</b>	6,90	2,86	0,89
<b>Filtro 2 (Con Geotextil, 0.5m/h)</b>	3,33	2,94	1,11
<b>Filtro 3 (Con Geotextil, 0.2m/h)</b>	3,16	1,72	0,93

En la Tabla 11 se observa que los filtros que contaron con geotextil NT permitieron una penetración de lodo menor al 50% en la capa superficial, en comparación con el FLA1 donde la arena realizaba todo el almacenamiento de lodo. En otras palabras, en ambos casos el geotextil NT almaceno más de la mitad del lodo, no obstante aún sigue existiendo un trasvase.

Estos resultados coinciden con la investigación realizada por Fernández et al. (2001), quienes presentaron penetración de lodo en la superficie y en profundidades mayores a 5cm y afirman que aunque el geotextil presenta remoción y depósito de lodo, aún persiste la necesidad de raspado superficial del lecho filtrante y en algunos casos raspado a profundidad.

A pesar del almacenamiento de lodo proporcionado por el geotextil, el filtro 2 presento mayor porcentaje de traspaso de lodo en capas intermedias e inferiores, posiblemente el incremento de la velocidad de filtración facilita la penetración de lodo en el lecho filtrante, provocando así una mayor pérdida en el lecho de arena y por tanto menor duración de carrera.

Con todo lo anteriormente presentado, se puede afirmar que la acción del geotextil prolonga la carrera de filtración significativamente, además de permitir mejores comportamientos en los picos máximos, es decir, cuando la calidad del agua afluyente está por encima de los rangos recomendados y permitir una menor penetración de lodo en el lecho de filtración. Por otro lado, una velocidad de 0.5 m/h disminuyó la carrera de filtración considerablemente, a pesar de la implementación de un geotextil NT.

## CONCLUSIONES

Para garantizar un adecuado funcionamiento de un sistema de filtración lenta en arena y un óptimo cumplimiento de las normas de calidad de agua potable, es recomendable asegurar las condiciones ideales del agua afluente.

La implementación del geotextil NT 1600 y el incremento de la tasa de filtración no afectan la calidad fisicoquímica ni la microbiológica del agua tratada:

El uso de geotextiles NT 1600 disminuye la pérdida de carga en los filtros lentos en arena, por lo que hay un incremento en la duración carrera de filtración de hasta un 36% en comparación a un filtro lento en arena regular. Cabe agregar que en un FLA con geotextil NT 1600 la pérdida de carga no se ve afectada drásticamente cuando se presentan valores de turbiedad fuera de los rangos recomendados para el uso de este tipo de sistemas.

El uso de Geotextiles NT 1600 no evita el trasvase de lodos hacia el lecho filtrante, no obstante si logra retener gran parte de estos, evitando que la pérdida de carga se concentre totalmente en el lecho de arena, lo que posibilita el aumento en la duración de carrera de filtración.

El aumento de la velocidad de filtración aumenta el trasvase de lodos a través del geotextil NT 1600 y disminuye proporcionalmente la duración de carrera de los filtros lentos en arena a pesar del uso del mismo.

El comportamiento exponencial de la pérdida de carga en los filtros lentos en arena posibilitaría la reducción de la altura de las estructuras de los filtros lentos considerablemente, reduciendo costos de inversión inicial. Además la instauración de geotextil NT, asegura una menor frecuencia en los raspados superficiales y la limpieza de este se puede realizar fácilmente con flujos de agua a presión.

## **RECOMENDACIONES**

Evaluar el impacto de la disminución de la altura disponible para desarrollo de pérdida de carga en la duración de carrera de filtración y su relación costo-beneficio.

Evaluar velocidades de filtración relativamente altas con diferentes espesores de geotextil NT, analizando su efecto en la duración de carrera de filtración y la calidad de agua tratada.



## BIBLIOGRAFÍA

- Aráuz, M. A. & Castillo, V. (2017). *Determinación de la concentración de Trihalometanos producidos por reacción del cloro con la Materia Orgánica Nitrogenada en muestras de agua del Río Fonseca, Departamento de Boaco, en el período Enero - Marzo del 2008* (tesis de pregrado). Universidad de Centroamerica, Managua, Nicaragua.
- Di Bernardo, L.; Brandao, C.; HELLER, L. *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas*. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- De Souza Dos Santos, F.F. (2015). *Comparação entre os meios filtrantes areia e não tecido sintético na eficiência da filtração lenta para tratamento de agua*. (Tesis doctoral). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Fenga Ferraz, C. (2001). *Influência da redução da espessura da camada suporte na eficiência da filtração lenta com uso de mantas não tecidas para águas de abastecimento*. (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Fenga Ferraz, C., Stipp Paterniani, J.E. (2002). *Redução da espessura da camada suporte através da substituição por mantas não-tecidas na filtração lenta de águas de abastecimento*. Engenharia sanitária e ambiental, 7(1), 8-15.
- Fernández M., J., Latorre M., J., Berón C., F., Muñoz, N., & Vargas, V. (2001). *Uso de mantas sintéticas y naturales en filtración lenta en arena. Una experiencia en ambientes tropicales*. Cinara. Universidad del Valle.
- Fernández M., J., Sanchez T., A., Latorre M., J., Muñoz S., N., Berón C., F., & Restrepo, M. (2001). *Uso de Fibras Naturales y Sintéticas en filtración Lenta en Colombia*. Cali, Colombia.: Universidad del Valle. Cinara.
- Fernández, M. J., Escobar, H. I. & Peña, P. W. (2010). Determinación de la viabilidad en uso de geotextil no tejido como medio filtrante, en flujo horizontal, para la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes en efluentes de piscifactorias de trucha. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 2 (2). Recuperado de: <https://jci.uniautonoma.edu.co/2010/2010-6.pdf>.
- Galvis G., Latorre J. (1999). *Filtración en Múltiples Etapas*

- Jaramillo, M. (2013). *Evaluación de una manta sintética no tejida en un sistema piloto de filtración lenta para el tratamiento de agua* (tesis de maestría). Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
- Mondal P., Seth R., & Biswas N. (2007). Performance evaluation of fabric aided slow sand filter in drinking water treatment. Recuperado el 13 de agosto de 2017 de la página Researchgate:  
[https://www.researchgate.net/publication/237152288\\_Performance\\_evaluation\\_of\\_fabric\\_aided\\_slow\\_sand\\_filter\\_in\\_drinking\\_water\\_treatment](https://www.researchgate.net/publication/237152288_Performance_evaluation_of_fabric_aided_slow_sand_filter_in_drinking_water_treatment).
- Muñoz J., & Orta, M. (2012). *Efecto del ozono en la remoción de materia orgánica disuelta de un efluente secundario*. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- National Environmental Services Center. (2009). *Filtración Lenta con Arena*. Morgantown: West Virginia University.
- OMS (2015). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 21 de abril de 2018, de Sitio web de OMS: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/es/).
- PAVCO. (2008). Mexichem. Recuperado de <https://pavco.com.co/2/geotextiles/5-1212-1227/i/1227>
- Pereira Tangerino, Edson, Rosa Araujo, Laryssa Melo, Medri Borges, Rívea, Sánchez Ortiz, Iván Andrés, *Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas*. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33929482006>> ISSN 0378-1844
- Rivas, A. M. & García, M. W. (2017). *Evaluación de la filtración lenta de arena para la potabilización del agua en el corregimiento de San José de Playón* (tesis de pregrado). Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Sánchez, L. D., Sánchez, A., Galvis, G., & Latorre, J. (2007). *Filtración en Múltiples Etapas*. Cali, Colombia: Universidad del Valle. Cinara

## ANEXOS

### Anexo 1. Datos obtenidos para las características fisicoquímicas

**Tabla 1.1.** Datos fisicoquímicos obtenidos para los sistemas piloto de filtración lenta.

Fecha	Dia	Turbiedad (UNT)				Color (UPC)				UV 254nm				pH				Temperatura			
		Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
3/01/2018	0	2.30	5.37	3.77	4.74	23	45	26	32	0.047	0.111	0.090	0.099	7.51	7.45	7.61	7.56	17.7	17.9	17.4	17.6
10/01/2018	7	2.18	2.21	1.98	2.05	19	21	16	23	0.056	0.065	0.058	0.056	7.37	7.38	7.39	7.46	17.7	17.9	17.4	17.5
15/01/2018	12	2.07	1.94	1.77	1.86	24	20	18	20	0.048	0.054	0.050	0.057	7.12	7.57	7.35	7.21	19.6	19.9	19.8	19.8
17/01/2018	14	2.80	1.54	1.59	1.19	21	17	15	16	0.052	0.043	0.041	0.040	7.24	7.29	7.15	7.10	20.5	20.7	20.7	20.8
19/01/2018	16	2.56	0.68	0.61	0.66	28	18	17	17	0.056	0.045	0.047	0.052	7.23	7.17	7.12	7.02	20.7	20.5	21.0	21.2
22/01/2018	19	2.90	1.40	1.60	1.38	20	15	16	15	0.055	0.048	0.044	0.038	7.26	7.26	7.16	7.18	18.7	17.4	16.8	17.0
24/01/2018	21	2.74	1.17	1.35	1.36	23	14	14	13	0.063	0.042	0.045	0.043	7.30	7.23	7.10	7.01	19.3	18.8	19.1	19.3
26/01/2018	23	2.59	1.21	1.16	1.77	22	14	13	13	0.054	0.041	0.040	0.051	7.39	7.21	7.22	7.28	22.3	22.4	22.7	22.0
29/01/2018	26	2.52	1.01	1.32	1.11	21	12	14	11	0.056	0.043	0.045	0.041	7.28	7.38	7.23	7.29	23.8	23.0	24.9	24.2
2/02/2018	30	2.61	1.12	1.32	1.28	19	8	8	9	0.056	0.043	0.044	0.044	7.37	7.35	7.18	7.07	21.9	22.0	22.3	22.7
5/02/2018	33	2.59	0.80		1.29	16	6		7	0.060	0.048		0.059	7.32	7.53		7.32	23.2	23.7		23.9
7/02/2018	35	4.94	1.89		1.92	57	49		51	0.194	0.148		0.143	7.09	7.14		7.01	21.9	22.2		22.3
9/02/2018	37	2.61	0.58		0.53	24	11		12	0.083	0.065		0.066	7.16	7.13		7.02	23.3	23.4		23.6
12/02/2018	40	4.19	0.74		0.82	30	12		13	0.093	0.069		0.077	7.39	7.34		7.20	22.0	22.7		22.7
14/02/2018	42	2.05	0.39		0.32	22	6		12	0.069	0.052		0.056	7.26	7.17		7.16	22.1	22.0		22.4
16/02/2018	44	1.86	0.52		0.52	23	14		15	0.085	0.075		0.076	7.19	7.11		7.05	21.5	21.3		21.8
19/02/2018	47	20.23	5.79		8.23	100	86		95	0.346	0.272		0.280	7.70	7.30		7.10	22.6	22.5		22.5
21/02/2018	49	5.67	1.86		1.90	71	51		57	0.223	0.174		0.186	7.40	7.20		7.20	21.5	21.4		21.6
23/02/2018	51	4.15	1.76		1.81	37	23		22	0.133	0.106		0.112	7.30	7.20		7.10	21.5	21.2		21.2
26/02/2018	54	2.75	1.02		1.38	29	16		18	0.107	0.082		0.087	7.56	7.44		7.14	22.1	23.1		22.7
28/02/2018	56	3.00	1.73		1.32	34	21		18	0.108	0.088		0.085	7.20	7.20		7.10	21.1	20.9		21.4
2/03/2018	58	2.39	1.23		1.33	23	16		16	0.118	0.116		0.107	7.08	7.07		6.94	21.6	21.1		21.1
5/03/2018	61	1.94			1.29	27			15	0.107			0.091	7.58			7.60	21.9			22.2
7/03/2018	63	2.37			0.97	24			10	0.093			0.073	7.32			7.41	21.5			21.7
9/03/2018	65	2.05			0.75	18			3	0.080			0.065	7.25			6.96	21.7			22.0
12/03/2018	68	1.92			1.04	11			4	0.078			0.066	7.12			7.06	21.7			21.3
14/03/2018	70	2.34			1.37	21			11	0.079			0.061	7.26			7.31	22.5			22.4
16/03/2018	72	1.97			1.08	24			16	0.094			0.090	7.20			6.92	21.5			21.7
20/03/2018	76	4.83			1.85	59			32	0.152			0.134	7.04			6.96	21.8			21.7
22/03/2018	78	2.30			0.74	24			12	0.077			0.063	7.12			7.21	22.0			22.3
23/03/2018	79	7.02			0.60	74			12	0.076			0.057	7.10			7.29	22.5			22.4

**Anexo 2.** Seguimiento y control de caudales de entrada y velocidades de filtración.

**Tabla 2.1.** Caudales de entrada y velocidades de filtración medidos en campo.

Fecha	Q(mL/s)			V(m/h)		
	FLA1	FLA2	FLA3	FLA1	FLA2	FLA3
3/01/2018	9.33	24.78	9.94	0.187	0.496	0.199
5/01/2018	10.62	25.06	10.11	0.212	0.501	0.202
8/01/2018	9.93	24.59	9.66	0.199	0.492	0.193
9/01/2018	10.07	23.97	10.35	0.201	0.479	0.207
10/01/2018	10.15	24.83	10.24	0.203	0.497	0.205
12/01/2018	10.33	25.14	10.26	0.207	0.503	0.205
15/01/2018	10.25	24.91	10.37	0.205	0.498	0.207
16/01/2018	10.17	24.86	9.98	0.203	0.497	0.200
17/01/2018	9.93	24.56	10.23	0.199	0.491	0.205
19/01/2018	10.27	25.06	10.44	0.205	0.501	0.209
22/01/2018	9.89	24.92	10.13	0.198	0.498	0.203
23/01/2018	10.14	25.33	10.41	0.203	0.507	0.208
24/01/2018	10.09	24.84	9.95	0.202	0.497	0.199
26/01/2018	10.43	24.93	10.22	0.209	0.499	0.204
29/01/2018	10.38	24.96	9.87	0.208	0.499	0.197
30/01/2018	9.59	24.83	10.41	0.192	0.497	0.208
31/01/2018	10.34	24.87	10.11	0.207	0.497	0.202
2/02/2018	10.67	24.8	10.08	0.213	0.496	0.202
5/02/2018	10.41		10.32	0.208		0.206
6/02/2018	9.67		9.91	0.193		0.198
7/02/2018	10.31		10.15	0.206		0.203
9/02/2018	10.19		10.53	0.204		0.211
12/02/2018	9.79		10.35	0.196		0.207
13/02/2018	10.25		10.19	0.205		0.204
14/02/2018	10.36		9.88	0.207		0.198
16/02/2018	10.08		10.37	0.202		0.207
19/02/2018	10.3		10.03	0.206		0.201
20/02/2018	10.12		9.97	0.202		0.199
21/02/2018	10.43		10.29	0.209		0.206
23/02/2018	10.03		10.18	0.201		0.204
26/02/2018	9.73		9.87	0.195		0.197
27/02/2018	10.17		9.68	0.203		0.194
28/02/2018	9.97		10.13	0.199		0.203
2/03/2018	10.22		10.33	0.204		0.207
5/03/2018			9.89			0.198
6/03/2018			9.92			0.198
7/03/2018			10.46			0.209
9/03/2018			10.34			0.207
12/03/2018			10.16			0.203
13/03/2018			9.85			0.197
14/03/2018			10.13			0.203
16/03/2018			10.24			0.205
20/03/2018			10.39			0.208
21/03/2018			9.78			0.196
22/03/2018			10.09			0.202
23/03/2018			10.52			0.210

**Anexo 3.** Datos de eficiencias obtenidas en la remoción de parámetros fisicoquímicos.

**Tabla 3.1.** Porcentajes de remoción de parámetros fisicoquímicos.

Fecha	Dia	Turbiedad (UNT)			Color aparente (UPC)			UV 254 nm		
		%rem1	%rem2	%rem3	%rem1	%rem2	%rem3	%rem 1	%rem2	%rem3
3/01/2018	0	-133.67	-64.15	-106.24	-95.65	-11.59	-37.68	-134.51	-90.85	-108.45
10/01/2018	7	-1.38	9.02	5.96	-10.75	11.83	-22.58	-15.98	-2.37	0.59
15/01/2018	12	6.27	14.79	10.13	16.90	23.94	15.49	-11.03	-3.45	-17.24
17/01/2018	14	44.95	43.40	57.55	19.05	30.16	25.40	16.67	21.79	23.72
19/01/2018	16	73.31	76.14	74.03	34.94	39.76	39.76	20.24	15.48	7.14
22/01/2018	19	51.66	45.01	52.35	23.73	18.64	23.73	11.59	20.12	30.49
24/01/2018	21	57.47	50.67	50.55	39.13	37.68	42.03	33.33	28.57	31.22
26/01/2018	23	53.47	55.40	31.75	36.92	38.46	41.54	25.15	26.99	5.52
29/01/2018	26	60.05	47.75	55.95	43.75	34.38	46.88	22.62	19.64	26.19
2/02/2018	30	56.91	49.49	50.90	58.93	55.36	53.57	23.21	22.02	21.43
5/02/2018	33	69.24		50.06	59.57		57.45	19.55		1.12
7/02/2018	35	61.77		61.16	13.45		10.53	24.01		26.24
9/02/2018	37	77.81		79.85	52.78		50.00	21.60		21.20
12/02/2018	40	82.32		80.49	58.43		55.06	25.71		17.14
14/02/2018	42	80.84		84.32	71.21		45.45	24.27		18.93
16/02/2018	44	72.17		72.17	39.13		34.78	12.16		10.59
19/02/2018	47	71.40		59.34	13.95		4.98	21.46		19.06
21/02/2018	49	67.18		66.41	28.04		20.56	22.01		16.32
23/02/2018	51	57.64		56.27	39.29		40.18	20.10		15.58
26/02/2018	54	62.91		49.70	44.32		38.64	23.36		19.00
28/02/2018	56	42.44		55.89	36.63		46.53	18.21		21.60
2/03/2018	58	48.54		44.35	31.88		31.88	1.98		9.60
5/03/2018	61			33.68			43.90			14.69
7/03/2018	63			59.21			56.94			21.15
9/03/2018	65			63.52			81.48			18.75
12/03/2018	68			45.93			66.67			14.59
14/03/2018	70			41.45			46.77			22.78
16/03/2018	72			45.01			33.33			4.24
20/03/2018	76			61.79			46.33			11.84
22/03/2018	78			67.78			47.89			17.83
23/03/2018	79			91.45			83.78			24.67

**Anexo 4.** Datos de conteo de coliformes fecales y totales con sus respectivos porcentajes de remoción.

**Tabla 4.1.** Conteo total de coliformes totales y fecales con sus respectivos porcentajes de remoción.

Fecha	Dia	Coliformes Totales (UFC/100mL)							Coliformes Fecales (UFC/100mL)						
		Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	%rem FLA 1	%rem FLA 2	%rem FLA 3	Entrada	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	%rem FLA 1	%rem FLA 2	%rem FLA 3
09/01/2018	6	110	96	42	72	12,7	61,8	34,5	23	23	17	22	2,17	24,64	5,80
17/01/2018	14	400	34	28	42	91,4	93,0	89,5	27	14	8	8	48,75	68,75	70,00
24/01/2018	21	255	15	13	17	94,3	95,1	93,5	5	3	4	3	44,44	22,22	33,33
31/01/2018	28	895	21	17	38	97,7	98,2	95,8	27	6	7	13	79,63	74,07	51,85
07/02/2018	35	90	13		6	86,1		93,9	29	8		4	74,14		87,93
14/02/2018	42	2020	5		6	99,8		99,7	2	2		2	0,00		0,00
21/02/2018	49	1740	46		41	97,4		97,7	17	10		6	44,12		67,65
28/02/2018	56	1470	11		12	99,3		99,2	15	2		7	86,21		51,72
07/03/2018	63	405			5			98,9	2			1			50,00
17/03/2018	73	540			3			99,4	8			0			100,00
22/03/2018	78	695			21			97,0	72			11			84,62

**Anexo 5.** Datos de pérdida de carga de los sistemas de filtración lenta en arena.

**Tabla 5.1.** Reporte de pérdidas de carga de los FLA hasta el final de su carrera de filtración.

Fecha	Dia	Filtro 1 (Blanco)			Filtro 2				Filtro 3			
		HF Arena	HF Grava	HF Total	HF Geotextil	HF Arena	HF Grava	HF Total	HF Geotextil	HF Arena	HF Grava	HF Total
03/01/2018	0	3,10	0,30	3,40	0,00	9,20	0,50	7,00	0,00	2,10	1,00	3,10
10/01/2018	7	1,80	0,75	2,55	0,00	7,40	0,80	8,20	0,00	2,00	0,20	2,20
12/01/2018	9	2,05	0,55	2,60	0,00	6,80	0,70	7,50	0,00	2,05	0,35	2,40
15/01/2018	12	1,80	0,55	2,35	0,10	7,45	0,75	8,30	0,00	2,10	0,20	2,30
16/01/2018	13	2,10	0,45	2,55	0,00	9,30	0,80	10,10	0,00	1,80	0,20	2,00
17/01/2018	14	2,20	0,50	2,70	0,05	9,45	0,70	10,20	0,00	2,20	0,20	2,40
19/01/2018	16	2,20	0,30	2,50	0,00	11,05	0,75	11,80	0,00	2,70	0,20	2,90
22/01/2018	19	3,10	0,30	3,40	0,00	12,05	0,70	12,75	0,00	2,60	0,20	2,80
23/01/2018	20	2,40	0,45	2,85	0,00	12,05	0,80	12,85	0,00	2,50	0,20	2,70
24/01/2018	21	3,25	0,40	3,65	0,10	14,15	0,75	15,00	0,00	2,60	0,20	2,80
26/01/2018	23	2,90	0,20	3,10	0,30	14,80	0,70	15,80	0,00	2,60	0,20	2,80
29/01/2018	26	3,20	0,40	3,60	0,40	15,25	0,85	16,50	0,00	2,70	0,20	2,90
30/01/2018	27	3,30	0,30	3,60	1,10	15,55	0,75	17,40	0,00	2,70	0,20	2,90
01/02/2018	29	3,70	0,30	4,00	0,50	18,40	0,50	19,40	0,00	3,30	0,15	3,45
02/02/2018	30	3,70	0,35	4,05	0,50	18,00	0,70	19,20	0,00	3,35	0,20	3,55
05/02/2018	33	3,30	0,40	3,70					0,00	3,00	0,30	3,30
06/02/2018	34	3,70	0,45	4,15					0,05	3,55	0,10	3,70
07/02/2018	35	4,00	0,40	4,40					0,05	3,65	0,15	3,85
09/02/2018	37	4,35	0,40	4,75					0,10	4,35	0,10	4,55
12/02/2018	40	4,70	0,40	5,10					0,05	3,55	0,10	3,70
13/02/2018	41	5,40	0,30	5,70					0,05	4,20	0,15	4,40
14/02/2018	42	6,05	0,45	6,50					0,05	4,35	0,20	4,60
16/02/2018	44	6,20	0,50	6,70					0,05	4,55	0,10	4,70
19/02/2018	47	6,40	0,50	6,90					0,10	4,60	0,15	4,85
20/02/2018	48	6,70	0,40	7,10					0,10	4,60	0,15	4,85
21/02/2018	49	6,80	0,50	7,30					0,10	4,90	0,10	5,10
23/02/2018	51	8,60	0,50	9,10					0,10	5,10	0,10	5,30
26/02/2018	54	13,10	0,50	13,60					0,15	5,45	0,10	5,70
27/02/2018	55	16,00	0,50	16,50					0,20	5,70	0,10	6,00
28/02/2018	56	20,00	0,50	20,50					0,35	5,80	0,20	6,35
02/03/2018	58	22,30	0,50	22,80					0,45	6,20	0,20	6,85
05/03/2018	61								0,60	6,00	0,15	6,75
06/03/2018	62								0,60	6,40	0,15	7,15
07/03/2018	63								0,70	6,70	0,15	7,55
09/03/2018	65								0,80	6,80	0,15	7,75
12/03/2018	68								2,00	6,20	0,10	8,30
13/03/2018	69								2,35	7,30	0,20	9,85
14/03/2018	70								2,40	8,15	0,20	10,75
16/03/2018	72								2,80	8,60	0,20	11,60
20/03/2018	76								3,50	8,95	0,15	12,60
21/03/2018	77								5,10	7,60	0,10	12,80
22/03/2018	78								5,90	7,70	0,10	13,70
23/03/2018	79								6,80	14,00	0,20	21,00

**Anexo 6.** Datos estadísticos de la remoción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

**Tabla 6.1.** Resumen estadístico para % Remoción de Turbiedad.

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
<b>filtro 1</b>	19	26.429	1.391	1.346
<b>filtro 2</b>	7	8.937	1.277	0.111
<b>filtro 3</b>	28	39.809	1.422	1.974

**Tabla 6.1.2.** ANOVA para % Remoción de Turbiedad por FLA.

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
<b>Entre grupos</b>	0.118	2	0.059	0.038	0.962	3.179
<b>Dentro de los grupos</b>	78.200	51	1.533			
<b>Total</b>	78.318	53				

**Tabla 6.2.** Resumen estadístico para % Remoción de Color.

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
<b>Filtro 1</b>	19	410.667	21.614	394.867
<b>filtro 2</b>	7	97.333	13.905	7.360
<b>filtro 3</b>	28	545	19.464	361.196

**Tabla 6.2.1.** ANOVA para %Remoción de Color por FLA.

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
<b>Entre grupos</b>	304.096	2	152.048	0.459	0.635	3.179
<b>Dentro de los grupos</b>	16904.070	51	331.452			
<b>Total</b>	17208.167	53				



**Tabla 6.3.** Resumen Estadístico para % Remoción de UV 254nm

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
<b>Filtro 1</b>	22	1.83	0.083	0.003
<b>Filtro 2</b>	10	0.503	0.050	0.000
<b>Filtro 3</b>	31	2.56	0.083	0.002

**Tabla 6.3.1.** ANOVA para % Remoción de UV 254 nm por FLA.

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
<b>Entre grupos</b>	0.009	2	0.004	1.897	0.159	3.150
<b>Dentro de los grupos</b>	0.141	60	0.002			
<b>Total</b>	0.150	62				

**Tabla 6.4.** Resumen Estadístico para % Remoción de coliformes totales.

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
<b>Filtro 1</b>	7	142.833	20.405	209.4246032
<b>Filtro 2</b>	3	57	19	64.75
<b>Filtro 3</b>	10	188.5	18.85	245.5583333

**Tabla 6.4.1.** ANOVA para % Remoción de coliformes totales por FLA.

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
<b>Entre grupos</b>	10.566	2	5.283	0.025	0.975	3.592
<b>Dentro de los grupos</b>	3596.073	17	211.534			
<b>Total</b>	3606.639	19				

**Tabla 6.5.** Resumen Estadístico para % Remoción de coliformes fecales.

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
<b>Filtro 1</b>	7	42.167	6.024	20.337
<b>Filtro 2</b>	3	18.833	6.278	6.231
<b>Filtro 3</b>	10	53.5	5.35	19.058

**Tabla 6.5.1.** ANOVA para % Remoción de coliformes fecales por FLA.

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
<b>Entre grupos</b>	2.948	2	1.474	0.082	0.922	3.592
<b>Dentro de los grupos</b>	306.012	17	18.001			
<b>Total</b>	308.960	19				