

**ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN
SISTEMAS DE TRATAMIENTO CON FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS
EN UN AMBIENTE TROPICAL.**

**EDWIN JAIR BENAVIDES HUALPA
ALBEIRO CRUZ MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, G.I.I.A
POPAYÁN
2005**

**ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN
SISTEMAS DE TRATAMIENTO CON FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS
EN UN AMBIENTE TROPICAL.**

**EDWIN JAIR BENAVIDES HUALPA
ALBEIRO CRUZ MUÑOZ**

**Trabajo de grado, requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

**Director
JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA
Ingeniero Sanitario, MSc.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, G.I.I.A
POPAYÁN
2005**

Nota de aceptación

Javier Ernesto Fernández Mera
Director

John Calderon Ramirez
Jurado

Guillermo Chaux Figueroa
Jurado

Fecha de sustentación: Popayán, _____de Diciembre de 2005

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a.

La Universidad del Cauca y la Corporación Autónoma Regional del Cauca (C.R.C) por el establecimiento del convenio 745, el cual permitió el desarrollo de la presente investigación.

Javier Ernesto Fernández Mera, Ingeniero Sanitario y director de la investigación, por sus valiosos aportes, orientaciones y constante motivación.

Paulo Mauricio Espinosa Echeverri, Ingeniero Químico y director del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, por las facilidades de usar los equipos e instalaciones del laboratorio.

Personal del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, por su colaboración y ayuda en el suministro de equipo y elementos necesarios para llevar a cabo la investigación.

Comité de investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, por su colaboración y la confianza para llevar a cabo esta investigación. En especial al departamento de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

La comunidad del corregimiento de La Venta, Municipio de Cajibío por las facilidades prestadas en la planta de tratamiento donde se desarrolló la parte experimental de ésta investigación.

CONTENIDO

	Pág
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	14
1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	15
2 HIPÓTESIS	18
3 OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. REVISIÓN DE LITERATURA	20
4.1 FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FiME)	20
4.1.1 Filtración Gruesa Dinámica (FGDi)	20
4.1.2 Filtración Gruesa Ascendente en Capas (FGAC)	22
4.1.3 Filtración Lenta en Arena (FLA)	24

4.2 EL CULTIVO DEL FIQUE	27
4.2.1 El Fique	27
4.2.2 Características de la Planta	27
4.2.3 Características y Composición de la Fibra	28
4.2.4 El sector Figuero	28
5. METODOLOGÍA	30
5.1 CONCEPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	30
5.2 DESARROLLO DEL OBJETIVO I	30
5.3 DESARROLLO DEL OBJETIVO II	31
5.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	32
5.4.1 Parámetros de Diseño y Dimensiones del FGD _i , FGAC y FLA	33
5.4.2 Análisis Granulométrico del Lecho Filtrante del FLA	34
5.5 MÉTODOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS	34
5.5.1 Pérdidas de Carga	35
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36

6.1 CALIDAD DEL AGUA	36
6.2 COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL	39
6.3 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	42
6.3.1 Turbiedad	42
6.3.2 Color Real	44
6.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Absorbancia UV 254 nm	46
6.4 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	52
6.4.1 Coliformes Fecales	52
6.5 PARÁMETROS HIDRÁULICOS	55
6.5.1 Duración de la Carrera de Filtración	55
6.5.2 Comportamiento de la Pérdida de Carga	55
7. CONCLUSIONES	58
8. RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

	Pág
CAPITULO 4	
4.1 Eficiencias de remoción encontradas en fuentes superficiales tratadas por filtros gruesos dinámicos.	21
4.2 Eficiencias típicas de remoción por filtros gruesos ascendentes	23
4.3 Eficiencias típicas de tratamiento de unidades convencionales de FLA	26
4.4 Características químicas de la fibra de fique.	28
CAPITULO 5	
5.1 Parámetros, puntos y frecuencias de muestreo.	31
5.2 Parámetros, puntos y frecuencias de muestreo para la medición de materia orgánica	31
5.3 Parámetros de diseño y dimensiones del FGD _i , FGAC y FLA de la planta de tratamiento.	34
5.4 Metodología utilizada para la realización de los ensayos en Parámetros Físico- Químicos y microbiológicos.	35
CAPITULO 6	
6.1 Estadística descriptiva de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para el agua cruda a la entrada de la planta.	37
6.2 Clasificación de los niveles de calidad de las fuentes de abastecimiento en función de parámetros mínimos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos, (RAS 2000).	38

6.3	Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a la salida de la cabecera municipal de Totoró y Entrada al canal de captación.	39
6.4	Estadística descriptiva del comportamiento de caudal y tasa de filtración de las unidades de FGAC y FLA durante la carrera de filtración.	40
6.5	Estadística descriptiva de la turbiedad para cada punto de muestreo.	42
6.6	Estadística descriptiva del color real para cada punto de muestreo.	44
6.7	Estadística descriptiva de la calidad del agua para cada punto de muestreo respecto a los parámetros DBO, DQO y UV 254 nm.	47
6.8	Estadística descriptiva de la calidad del agua para cada punto de muestreo respecto al contenido de coliformes fecales.	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág
CAPITULO 4	
4.1 Filtros Gruesos Dinámicos, FGDi, operando en paralelo. Planta de tratamiento la Venta Cajibío, 2005.	22
4.2 Filtro Grueso Ascendente en Capas, FGAC, con dos unidades en paralelo. Planta de tratamiento La Venta Cajibío, 2005.	23
4.3 Filtro Lento en Arena, FLA, con dos unidades en paralelo, mas ampliación de otras dos unidades. Planta de tratamiento La Venta Cajibío, 2005.	27
CAPITULO 5	
5.1 Esquema general de la planta FiME de La Venta Cajibío.	33
CAPITULO 6	
6.1 Comportamiento de la Turbiedad en los diferentes puntos de muestreo.	42
6.2 Comportamiento del Color real en los diferentes puntos de muestreo.	45
6.3 Comportamiento de la DBO en los diferentes puntos de muestreo.	48
6.4 Comportamiento de la DQO en los diferentes puntos de muestreo.	48
6.5 Comportamiento de UV254 en los diferentes puntos de muestreo.	49
6.6 Comportamiento del contenido de Coliformes Fecales en los diferentes puntos de muestreo.	54
6.7 Comportamiento de la pérdida de carga linealizada en el FGAC.	55
6.8 Comportamiento de la pérdida de carga linealizada en el FLA.	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A Aforo del vertedero del filtro lento en arena en la línea de estudio.	66
Anexo B Datos para el análisis granulométrico del lecho filtrante del filtro lento en arena.	70
Anexo C Comportamiento del pH.	71
Anexo D Comportamiento de la Turbiedad.	72
Anexo E Comportamiento del Color Real.	73
Anexo F Comportamiento de la absorbancia UV 254 nm.	74
Anexo G Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno.	75
Anexo H Comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.	76
Anexo I Comportamiento de Coliformes Fecales.	77
Anexo J Comportamiento de caudal y tasa de filtración de las unidades de FGAC y FLA.	78
Anexo K Pérdidas de carga (linealizada), de la unidad De Filtro Grueso en Capas.	79
Anexo L Pérdidas de carga (linealizada), de la unidad De Filtro Lento en Arena.	80

RESUMEN

El siguiente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto: **Estudio de la Remoción de Materia Orgánica en Sistemas de Tratamiento en Múltiples Etapas en un Ambiente Tropical**, por la Universidad del Cauca en convenio con la Corporación Autónoma Regional del Cauca C.R.C., el cual tuvo como objetivo principal: Aportar al desarrollo de la tecnología de Filtración en Múltiples Etapas (FiME), estudiando su aplicación en aguas con altos contenidos de materia orgánica natural en un ambiente tropical como el colombiano.

Para llevarlo a cabo se utilizó la planta de tratamiento a escala real del corregimiento de la Venta, Municipio de Cajibío, Cauca, la cual opera con tecnología FiME y cuyo funcionamiento se presenta de acuerdo a los siguientes componentes básicos:

- Filtro Grueso Dinámico (FGDi)
- Filtro Grueso Ascendente en Capas (FGAC) y
- Filtro Lento en Arena (FLA).

Para dar inicio a la parte experimental del proyecto se adoptó una línea de estudio en el sentido del flujo dentro de la planta de tratamiento. Posterior a la adecuación de las unidades de la línea de estudio se inició la parte experimental del proyecto la cual tuvo una duración de 7 ½ semanas. Esta etapa del proyecto se inició el 11/03/2005 y finalizó el 04/05/2005.

Para el corregimiento de La Venta, el sistema de acueducto se abastece con aguas de una fuente deficiente con tendencia a muy deficiente, la cual presentó una alta contaminación por materia orgánica natural y coliformes fecales con un promedio en la DBO de 3.07 mg/l, una DQO de 9.5 mg/l y 3679 UFC/100 ml de coliformes fecales.

En la evaluación del comportamiento hidráulico del sistema se realizaron lecturas de pérdidas de carga tanto en el filtro lento como en el filtro grueso ascendente. Las pérdidas determinaron la duración de la carrera de filtración la cual fue de 54 días.

Después de concluida la fase de muestreo se obtuvieron dentro de todo el sistema las siguientes eficiencias de remoción: DBO 88.0%, DQO 76.8%, UV254 nm

49.0%, Turbiedad 96.7%, y Color real 79.4%. En cuanto a coliformes fecales se obtuvo una eficiencia de 99.95%

Al finalizar la parte experimental del proyecto se pudo observar en los resultados que la tecnología desarrollada para la potabilización del agua, en este caso FiME presentó buenos resultados en la remoción de materia orgánica natural (MON), conllevando a que el agua que se trató sea considerada como un agua de buena calidad y no presente problema alguno para aplicar desinfección terminal, garantizando con esto que la población beneficiada no tenga riesgos en su salud.

INTRODUCCIÓN

La creciente dificultad del abastecimiento de agua de buena calidad en cantidades suficientes es una preocupación del mundo moderno. El abastecimiento de agua para el consumo humano es una de las medidas más relevantes destinadas a evitar la propagación de enfermedades, si se tiene en cuenta que el 80 % de todas las enfermedades y más del 33 % de las muertes en los países en desarrollo están relacionadas con la falta de agua en calidad y cantidad adecuadas (AIDIS, 1992).

En nuestro país la calidad del recurso hídrico que se utiliza para el consumo humano es afectada por la modificación de la cobertura vegetal, la explotación agropecuaria, los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, entre otros. Estos hechos ocasionan que en las fuentes se presente gran contaminación por arrastre de sólidos, elevadas cargas de materia orgánica y microbiológica y sustancias tóxicas, cuyos efectos contaminantes hace que se presenten elevados riesgos de enfermedades para las comunidades que se abastecen de este tipo de fuentes.

Frente a estas dificultades, la Filtración en Múltiples Etapas (FiME), se desarrolla con el fin de encontrar soluciones a las necesidades de mejoramiento de la calidad del agua para estas comunidades (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). FiME se presenta como una alternativa de tratamiento de agua de fuentes superficiales, la cual resulta más sencilla de sostener para las comunidades que requieren sistemas de menor complejidad, sobre todo a un nivel local de organización.

El presente trabajo tiene como objetivo principal aportar al desarrollo de la tecnología de Filtración en Múltiples Etapas, estudiando su aplicación en aguas con altos contenidos de materia orgánica natural en un ambiente tropical como el colombiano, para ello la fase experimental del proyecto se realizó en la planta FiME a escala real, ubicada en el corregimiento de la Venta Cajibío. En esta se evaluaron las eficiencias de remoción de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que determinan la calidad del agua, principalmente aquellos que están relacionados con el contenido de materia orgánica en la fuente de abastecimiento.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se estima que en la región de América Latina y el Caribe, 76 millones de habitantes, de un total de 510 millones, no tienen acceso a una fuente de agua segura. El vital elemento escasea incluso en las ciudades y los pueblos, donde las personas dependen de complejos sistemas de acueductos, tuberías y plantas de tratamiento para obtenerlo (Solo, 2003).

Esta condición no es diferente para Colombia, donde los niveles de cobertura y calidad del agua potable no son las adecuadas para gran parte de su población, presentándose las deficiencias más evidentes en el sector rural del país, lo que provoca que se presente un rezago frente a países de igual situación económica.

De acuerdo a información entregada por el censo de población de 1993, en Colombia la cobertura promedio nacional nominal del servicio de acueducto en las cabeceras municipales alcanza el 89.2% para el año 1998, beneficiando una población aproximada de 25.619.498 habitantes; se destaca que los municipios con una mayor cobertura son los menores de 2.500 habitantes, alcanzando en promedio el 93.6% y el grupo de menor cobertura corresponde a las capitales de departamento con población menor a 100.000 habitantes. Con base en los resultados globales, se calcula que la población sin servicio de acueducto con conexión domiciliaria para 1998, es de aproximadamente 3.099.554 colombianos (Cepis, 2000).

Como resultado de la proyección del censo DANE para 1998, en las zonas rurales del país existen 12.049.669 habitantes; la población con conexiones domiciliarias de acueducto alcanza los 5.024.712, para una cobertura aproximada del 41.7%, de los cuales solo el 10% dispone de agua de buena calidad (Cepis, 2000).

Aunque parezca que las cifras de cobertura en el país se encuentran en rangos aceptables y que en los últimos años se ha mejorado la situación del sector en cuanto a prestación del servicio, se debe destacar la ampliación de la brecha de coberturas entre la zona urbana y la rural lo cual ahonda las diferencias sociales y de oportunidades para un gran número de colombianos.

Pero igual o más preocupante aún que la cantidad de personas que carecen en la actualidad de la prestación del servicio, está la situación de la calidad del agua

que reciben quienes si cuentan con cobertura tanto a nivel urbano como a nivel rural, ya que a pesar de los grandes esfuerzos y avances logrados en relación con el aumento de cobertura del servicio de acueducto, los avances en términos de calidad del agua han sido más lentos.

De una muestra evaluada por el Ministerio de Desarrollo para 971 cabeceras locales, se encontró que el 35% aproximadamente alcanzan coberturas superiores al promedio nacional con dificultades para producir agua apta para consumo humano; de la muestra solo el 21% disponen de planta de tratamiento pero no están funcionando adecuadamente (Ministerio de Desarrollo Económico, 1998). Esto trae como consecuencia, que en nuestro país tan solo el 62% de la zona urbana disponga de agua potable, y solo el 10% de los habitantes de la zona rural puedan acceder a ella (Mondragón, 1996).

De otro lado, la gran mayoría de las fuentes de abastecimiento de agua en nuestro país proceden de reservorios ubicados en las zonas de alta montaña, donde se ha visto incrementada la acción y el impacto negativo del ser humano sobre los recursos naturales, esto ha ocasionado que en las fuentes de abastecimiento se presente un incremento en el material suspendido y contaminantes en general, lo cual hace necesario e indispensable realizar algún tipo de tratamiento al líquido para que este sea apto para el consumo humano.

La utilización de tecnología para el tratamiento de agua en Colombia considera unas pocas alternativas, se tiene que 587 plantas utilizan el tratamiento convencional, 202 utilizan el tratamiento compacto, las demás plantas utilizan otros procesos así: 113 Filtración Lenta, 19 Filtración en Múltiples Etapas (FiME) y 8 por sistemas de ablandamiento (Ministerio de Desarrollo Económico, 1998). Esta información muestra que la tecnología que utiliza el proceso de coagulación química es la más utilizada en Colombia, aun en zonas donde su aplicación presenta limitaciones como en la zona rural y el pequeño municipio. La aplicación de la tecnología de Filtración lenta y la de Filtración en Múltiples Etapas, aun es incipiente, a pesar de los desarrollos alcanzados en esta tecnología por el Instituto Cinara de la Universidad del Valle (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

La tecnología FiME, es promovida como una alternativa que facilita la sostenibilidad del sistema en la zona rural y los pequeños municipios, ya que sus costos de operación y mantenimiento, así como su bajo requerimiento en mano de obra calificada permiten su aplicación de manera eficiente, cuando la calidad del agua lo permite (Galvis, Latorre y Vischer, 1999).

Aunque la tecnología de FiME, ha sido muy estudiada en Colombia, aun se requiere conocer más a fondo algunos aspectos de su proceso, particularmente cuando trata aguas con altos contenidos de materia orgánica natural. En este sentido, las investigaciones han sido realizadas en países con ambientes estacionales (Bellamy et al, 1985, Fox et al, 1994, Haarhoff y Cleasby, 1991).

En Colombia muchas de las fuentes superficiales usadas en la zona rural, son contaminadas con desechos orgánicos provenientes de diferentes actividades agrícolas como el proceso del café, el fique, entre otros. En estos casos, aunque FiME podría ser una alternativa y tal vez la única que pueda ser sostenible, todavía no es claro si su aplicación conlleva a un proceso adecuado de tratamiento del agua, por lo tanto se requiere de una mayor investigación que permita resolver este tipo de inquietudes.

Partiendo de esas mismas inquietudes y con el ánimo de realizar un aporte al conocimiento del sistema de tratamiento de agua potable por FiME, y en particular de su comportamiento en condiciones de operación con aguas crudas que presentan altas cargas de material de tipo orgánico, se realizó este trabajo en una zona que ya cuenta con una planta FiME y de la cual se conoce se abastece de una fuente natural que presenta las características antes mencionadas para fuentes de este tipo en el contexto nacional.

Para este caso, el agua cruda es captada del río Cofre el cual abastece el sistema de acueducto del corregimiento de La Venta en el Municipio de Cajibío. Es importante mencionar que en esta fuente se presentan diferentes situaciones que conllevan al deterioro de la calidad del agua cruda como tal. Entre las situaciones más destacables se encuentran el lavado de la fibra de fique aguas arriba de la captación y en general sobre la parte alta de la cuenca, lo que presumiblemente contribuye al incremento de las concentraciones de materia orgánica medidas con base en la DBO , DQO y UV 254nm en el agua de la fuente. Otra situación de importancia la representa el vertimiento de las aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento del municipio de Totoró y otros asentamientos a lo largo de la cuenca.

2. HIPÓTESIS

Dado que en regiones con ambientes tropicales se favorecen los procesos microbiológicos debido principalmente a las condiciones climáticas de estos lugares, se espera que la tecnología de tratamiento de agua potable a través de filtración lenta, en la cual la mayor parte del tratamiento es llevada a cabo por microorganismos alojados en los filtros, sea una eficaz alternativa en la remoción de la carga orgánica que es frecuente en las fuentes de abastecimiento de las regiones tropicales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Aportar al desarrollo de la tecnología de filtración en múltiples etapas, estudiando su aplicación en aguas con altos contenidos de materia orgánica natural en un ambiente tropical como el colombiano.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I Estudiar el impacto en la eficiencia de remoción del tratamiento y el comportamiento hidráulico de sistemas de filtración en múltiples etapas que tratan aguas con altos contenidos de materia orgánica natural.

- II Estudiar el efecto de los diferentes componentes de un sistema de tratamiento por Filtración en Múltiples Etapas en la remoción de materia orgánica natural.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FiME)

La calidad del agua que el ser humano requiere para su consumo ha conllevado a que se implementen una serie de tratamientos para su potabilización, ya que de ello depende el bienestar y la salud de las comunidades que se benefician de los sistemas de tratamiento desarrollados para tal fin.

Dentro de las tecnologías desarrolladas para esta labor se encuentra la filtración en múltiples etapas, tecnología que ayuda al mejoramiento de la calidad del agua, porque al combinar diferentes etapas de tratamiento se remueven progresivamente los contaminantes para producir agua de buena calidad (Lloyd et al, 1991).

El funcionamiento de esta tecnología permite separar primero el material más pesado de mayor tamaño y gradualmente ir avanzando en la remoción del más pequeño, que incluye microorganismos, para finalizar en la desinfección (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

Para el logro de lo anterior, una planta de tratamiento que opera con tecnología FiME consta de las siguientes unidades de filtración:

- Filtración Gruesa Dinámica
- Filtración Gruesa Ascendente en Capas
- Filtración Lenta en Arena.

A continuación se presenta en detalle cada una de las unidades mencionadas anteriormente y su función dentro del proceso de tratamiento.

4.1.1 Filtración Gruesa Dinámica (FGDi). Un sistema FGDi consiste de dos módulos operados en paralelo con flujo descendente, donde cada unidad es empacada con lechos de grava de tamaños variables en el rango de gruesa en el fondo a fina en la superficie. La grava de menor tamaño origina grandes áreas superficiales dentro del lecho filtrante y por consiguiente, valores bajos de carga superficial, favoreciendo el proceso de sedimentación como mecanismo predominante en la remoción de material sólido (Galvis, Latorre y Visscher, 1996).

En un FGD_i el agua pasa verticalmente y en forma descendente a través de los lechos de grava y es recolectado en el fondo por el sistema de drenaje que lo conduce a la siguiente etapa de tratamiento (Galvis, Latorre y Vischer, 1999).

El medio filtrante esta conformado por tres capas de grava con tamaños que varían entre 3.0 y 25.0 mm. La capa mas fina se coloca en la superficie y la más gruesa sobre el fondo de la unidad cubriendo el sistema de drenaje (Galvis, Latorre y Vischer, 1999).

En cuanto a la velocidad de filtración se recomienda que esta no debe exceder los 3.0 m/h pues los valores de esfuerzo cortante producidos, pueden resuspender y transportar el material sedimentado, disminuyendo la eficiencia del proceso y modificando las rutinas de mantenimiento (Latorre, 1994).

En la tabla 4.1 se presentan las eficiencias de remoción alcanzadas en esta unidad de tratamiento, típicas para fuentes superficiales en Colombia, con diferentes niveles de riesgo (Galvis, Latorre y Vischer, 1999).

Tabla 4.1 Eficiencias de remoción encontradas en fuentes superficiales tratadas por filtros gruesos dinámicos.

PARÁMETRO	REDUCCION TÍPICA
Sólidos suspendidos	Entre el 70 y 80%, con fuentes en el rango de 10 a 200 mg/l
Turbiedad	Entre el 30 y 50 % en fuentes de zona plana. En fuentes de ladera, la remoción fue aproximada al 50%. La eficiencia de remoción es afectada por la naturaleza, tamaño y distribución de las partículas.
Color Real	Entre 10 y 25%, con fuentes en el rango entre 15 y 20 UPC
Hierro, manganeso	Entre el 40 y 70% como hierro total y entre el 40 y 60 % para manganeso
Coliformes Fecales	Entre 50 y 80 %, para niveles de coliformes fecales en el agua cruda en el rango 2000 a 10000 UFC/100 ml y sólidos suspendidos entre 10 y 50 mg/l.

La figura 4.1 muestra el filtro grueso dinámico de la planta de tratamiento de la Venta Cajibío la cual opera con agua del río Cofre.

Figura 4.1 Filtros Gruesos Dinámicos, FGD_i, operando en paralelo. Planta de tratamiento la Venta Cajibío, 2005.



4.1.2 Filtración Gruesa Ascendente en Capas (FGAC). El sistema de filtración gruesa ascendente está provisto de una o más unidades las cuales en su interior contienen grava de diferente tamaño la cual va en un rango de gruesa en el fondo a fina en la superficie. En sistemas con más de una unidad de filtración gruesa ascendente en serie, cada módulo se llena con un tamaño de grava predominante que decrece en el sentido del flujo (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

La filtración gruesa ascendente tiene la ventaja de favorecer la acumulación de sólidos en el fondo donde se localiza el sistema de drenaje, facilitando de esta manera el lavado hidráulico de las unidades. Adicionalmente, la dirección vertical del flujo reduce las interferencias ocasionadas por la temperatura o diferencias de densidad del fluido, esto mejora el comportamiento hidráulico de la unidad evitando zonas muertas y produciendo tiempos de retención más homogéneos. Estos factores influyen significativamente en la eficiencia del proceso de tratamiento (Galvis, et al, 1996).

Los filtros gruesos de flujo ascendente constituyen la segunda etapa de tratamiento orientada a minimizar el número de partículas gruesas y a disminuir el número de las más pequeñas.

Para el FGAC, el flujo que viene del FGD_i pasa en sentido ascendente por el lecho filtrante el cual consta de 5 capas de grava con tamaños diferentes, variando entre 25.0 y 1.6 mm en la dirección del flujo distribuidos en 1, 2, ó 3 compartimientos.

A continuación, en la tabla 4.2, se presentan las eficiencias de remoción típicas encontradas en sistemas de filtración gruesa ascendente, tanto en capas como en serie (FGAS), tratando aguas superficiales de valle y de ladera. Los filtros gruesos operan con velocidades de filtración entre 0.3 y 0.75 m/h, con lechos filtrantes entre 1.0 y 1.55 m de longitud. (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

Tabla 4.2 Eficiencias típicas de remoción por filtros gruesos ascendentes.

PARÁMETRO	REDUCCION TÍPICA
Sólidos suspendidos	Alcanza hasta el 95%, siendo el 90% el valor comúnmente reportado en fuentes superficiales con altos contenidos de material suspendido, en el rango de 50 a 200 mg/l. En fuentes con material suspendido en el rango de 5 a 50 mg/l, se reportan remociones del orden del 50 al 90%
Turbiedad	Entre el 50y 80 % en fuentes superficiales de valle, siendo mayores para los FGAS. En fuentes superficiales de ladera, la remoción esta en el rango 50% al 90%.
Color Real	Entre 20 y 50%
Hierro, manganeso	Alrededor del 50%
Coliformes Fecales	Reducción entre 0.65 y 2.5 unidades Log, siendo mayor para FGAS tratando agua con contaminación bacteriológica en el rango de 20000 a 100000 UFC/100 ml y contenido de sólidos suspendidos entre 20 y 200 mg/l, la menor eficiencia se presentó con fuentes con calidad bacteriológica entre 500 y 20000 UFC/100 ml.

En la Figura 4.2 se observa la unidad de FGAC de la planta FiME del corregimiento de La Venta en El Municipio de Cajibío, Cauca.

Figura 4.2 Filtro Grueso Ascendente en Capas, FGAC, con dos unidades en paralelo. Planta de tratamiento La Venta Cajibío, 2005.



Se debe tener en cuenta que durante la carrera de filtración y con el lecho limpio, se genera una diferencia estática entre el nivel del agua en la cámara de entrada y la superficie del agua en el filtro, cuyo valor debe ser igual a la sumatoria de la pérdida de carga entre los dos puntos, para el caudal de operación de la unidad. Esta diferencia se incrementa a través de la carrera de filtración, dada la colmatación del medio filtrante. El incremento de pérdida de carga es compensado con el aumento en el nivel de agua en la cámara de entrada al filtro grueso (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

4.1.3 Filtración Lenta en Arena (FLA). 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 y profundidad de 0.5 a 1.0 m., colocada sobre una camada de grava que constituye el medio de soporte y de transición. 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 (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

El tratamiento del agua en una unidad de FLA es el producto de un conjunto de procesos de naturaleza física, química y biológica, los cuales interactúan de manera compleja (Huisman et al, 1974) y cuyos mecanismos no se han acabado de comprender (Haarhoff et al, 1991).

El crecimiento biológico se da en el lecho de arena, especialmente sobre la superficie se forma una capa de depósitos inertes y material biológico llamado biopelícula (Schmutzdecke). Tanto la biopelícula como el crecimiento biológico sobre el lecho, tienen un rol importante sobre la efectividad de la filtración lenta en arena. Ambos pueden requerir semanas o meses para desarrollarse. Cuando la biopelícula se ha desarrollado completamente hasta el punto en el cual se colmata la superficie del medio filtrante, causa pérdidas de carga mayores a las establecidas inicialmente, y entonces el filtro deberá ser drenado y la capa superficial tendrá que ser removida (entre 1 y 2 cm.), (Sánchez, Latorre y Galvis, 1999).

Los principales mecanismos físicos asociados con la remoción de partículas en las unidades de FLA identificados por Haarhoff y Cleasby en 1991, de acuerdo a su revisión de literatura son: el cribado superficial que es eficaz removiendo partículas grandes de cerca de 30 μm , mucho mayores que las bacterias (0.1 a 10 μm), los virus (0.01 a 0.1 μm) y el material coloidal (0.001 a 1 μm). Debido a la importancia de la actividad biológica en el comportamiento de las unidades de FLA, los mismos autores consideran que la adherencia o la adsorción de

partículas este relacionada con la actividad biológica. En la medida en que partículas grandes son cribadas en la superficie del filtro, aumenta la probabilidad de que otras partículas más pequeñas, sean removidas también mediante este mecanismo. La remoción de las partículas pequeñas que entran a los poros del filtro, requieren mecanismos de transporte para ir a la superficie de la arena, donde deben actuar fuerzas de adherencia para que permanezcan allí (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

La filtración lenta en arena es reconocida como una tecnología de tratamiento sencilla, confiable y eficiente, no superada en ese conjunto de características por ningún otro proceso o etapa única de tratamiento (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). En efecto, FLA puede producir efluentes de baja turbiedad, libre de impurezas ofensivas disueltas y, aún más importante, virtualmente libres de entero-bacterias, entero-virus y quistes de protozoarios. Con base en revisión de literatura, en la tabla 4.3 se presenta una visión de las eficiencias de remoción que pueden alcanzarse con la tecnología FLA para varios parámetros de importancia sanitaria. Estas eficiencias han sido reportadas en unidades operadas con temperaturas superiores a 5 °C, velocidades en el rango de 0.04 a 0.20 m/h, profundidades de lecho filtrante superiores a 0.5 m y tamaños efectivos de los granos de arena entre 0.15 y 0.30 mm (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

Tabla 4.3 Eficiencias típicas de tratamiento de unidades convencionales de FLA (Bellamy et al, 1985; Ellis, 1985; Huck, 1987; Rachwal et al, 1988; Haarhoff, 1991; Hrubec et al, 1991; Fox et al, 1994).

Parámetro de calidad	Efluente o reducción típica	Comentarios
Turbiedad	< 1 UNT	Nivel de turbiedad, naturaleza y distribución de tamaño de partículas afectan capacidad de tratamiento.
Entero Bacterias	90 a 99,9%	Afectada por temperatura; velocidad de filtración; tamaño, uniformidad y altura de arena; limpieza de lechos.
Entero virus y quistes de Giardia	99 a 99,99%	Remociones altas, inclusive después de la limpieza de los lechos (remoción de biomembrana).
Cercarias de esquistosoma	100%	En condiciones adecuadas de operación y mantenimiento, la remoción es prácticamente completa.
Color real	25 a 30%	Color asociado con materia orgánica natural, sustancias húmicas.
TOC	< 15 – 25%	COT, Carbono orgánico total
COA	< 50%	COA, Carbono orgánico asimilable o biodegradable.
Precusores THM	< 25%	Precusores de Trihalometanos.
Hierro, manganeso	30 a 90%	Valores > 1 mg/l de Fe reducen carreras de filtración.

Aun con los valores altos de remoción resumidos en la tabla 4.3, frecuentemente la tecnología FLA, por si sola, no puede producir un efluente que cumpla consistentemente con las normas de calidad de agua establecidas, debido a los altos niveles de contaminación originados en la naturaleza geológica de algunas cuencas o a la falta de protección de muchas fuentes de agua.

La Figura 4.3 muestra la unidad de filtración lenta en arena de la planta FiME del corregimiento de La Venta en El Municipio de Cajibío, Cauca.

Figura 4.3 Filtro Lento en Arena, FLA, con dos unidades en paralelo, mas ampliación de otras dos unidades. Planta de tratamiento La Venta Cajibío, 2005.



4.2 EL CULTIVO DEL FIQUE

4.2.1 El Fique. Nombre con el cual se conocen en Colombia a las plantas que pertenecen al género *FURCRAEA*. Éste abarca cerca de 20 especies y algunas de ellas son utilizadas para extraer de sus hojas la fibra textil conocida como fique o cabuya. (Ecofibras, 2002)

4.2.2 Características de la Planta. Son plantas grandes, de tallo erguido, densamente poblado de hojas en forma radical. Su altura varía entre dos y siete metros. Sus hojas son largas, angostas, carnosas, puntiagudas, acanaladas, dentado espinosas y de color verde. El ancho de las hojas maduras varía entre 10 y 20 cm y el largo entre uno y dos metros.

El periodo típico de edad varía entre 10 y 20 años. Su vida útil comienza entre los tres y seis años, dependiendo de las condiciones que enfrente la planta. El periodo productivo alcanza unos ocho años, y la muerte le sobreviene cuando ha cumplido su ciclo vegetal que es cuando florece. (Ecofibras, 2002)

Para un buen desarrollo y rendimiento, la planta necesita: suelos de buena fertilidad, sueltos y no muy inclinados: buena exposición al sol y a las lluvias. Requiere más de elementos inorgánicos que orgánicos, por lo tanto sus raíces penetran el subsuelo que debe ser profundo, suelto, seco y con buen drenaje

natural ya que la planta no posee órganos adecuados para contener los excesos de agua.

La temperatura óptima para el cultivo esta entre los 18 y 24° C, en Colombia corresponden a alturas entre los 1000 y 2000 m.s.n.m. y que tengan una precipitación pluvial de 1.000 a 1.600 mm anuales. La humedad relativa de la región debe de estar entre 50 y 70%.

4.2.3 Características y Composición de la Fibra. Cada filamento esta constituido por fibrillas soldadas entre sí por una goma, los extremos de las fibrillas se sobreponen para formar filamentos multicelulares a lo largo de la hoja, y estos son los que conforman la fibra del fique.

Las características físicas como químicas varían según la clase de planta y condiciones del cultivo. En la tabla 4.3 Se tienen lo datos correspondientes a las características químicas de la fibra del fique (Ecofibras, 2002)

Tabla 4.4 Características químicas de la fibra de fique.

COMPUESTO	%
Celulosa	62,70
Pentosas	17,65
Lignina	15,47
Fibras	0,158
Cenizas	0,158

4.2.4 El Sector Fiquero. La planta de fique es nativa de América, y desde hace muchos años se la ha utilizado para extraer la fibra para ser empleada por el hombre para múltiples usos. En Colombia la producción de fibra de cabuya se presenta en departamentos como Cauca, Nariño, Santander, Antioquia, Boyacá y otros más. El número de hectáreas sembradas a nivel nacional en 1995 era de 21595. (Censo Departamental Fiquero, 1997). De las cuales 8667 hectáreas corresponden al departamento del Cauca.

Según el Censo Departamental Fiquero realizado en el año de 1997, para el departamento del Cauca el área total sembrada con fique es de 8667 hectáreas,

repartidas en doce municipios entre los cuales el municipio de Totoró aporta 1291 hectáreas, de las cuales 1046 se encuentran sembradas sobre el área de influencia de la cuenca del río Cofre.

5. METODOLOGÍA

5.1 CONCEPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto como tal se desarrolló en la planta a escala real del corregimiento La Venta, Municipio de Cajibío, que trata aguas con altos contenidos de materia orgánica la cual proviene de los desechos de la producción de Fique en la zona.

El estudio del presente trabajo sobre Filtración en Múltiples Etapas se llevó a cabo, concretamente sobre el acueducto del corregimiento de La Venta del municipio en cuestión, ubicado 4 kilómetros al sur-orienté de la cabecera municipal de Cajibío y a 25 Km. por vía panamericana de la ciudad de Popayán. El corregimiento se encuentra a una altitud promedio de 1800 m.s.n.m, la temperatura media anual es de 19º C. La economía del corregimiento depende del sector primario que se basa en la producción agrícola.

5.2 DESARROLLO DEL OBJETIVO I

Para el desarrollo de este objetivo se estudió una carrera de filtración sobre una línea del sistema de tratamiento, durante la cual se midió la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua a la entrada y salida de las diferentes unidades de tratamiento. También se midió el desarrollo de la pérdida de carga en estas unidades.

En la tabla 5.1 se presentan los parámetros, puntos de muestreo y frecuencia que se utilizó para el seguimiento. Se aclara que las mediciones en el punto: integrado de FGAC se realizaron porque en éste se redistribuye el caudal para el ingreso a los FLA.

Tabla 5.1 Parámetros, puntos y frecuencias de muestreo.

Parámetro	Agua Cruda	Salida FGD _i	Salida FGAC	Integrado FGAC	Salida FLA
Turbiedad	2S	2S	2S	2S	2S
Color Real	2S	2S	2S	2S	2S
Coliformes Fecales	2S	2S	2S	2S	2S
Caudal	-	2S	-	-	2S
Pérdida de Carga	-	-	2S	-	2S
pH	2S	2S	2S	2S	2S

S: Semana

Los parámetros fueron medidos con base en los protocolos del Standard Methods 1998.

Los datos de caudal se midieron con base en un vertedor triangular, el cual fue patronado previamente mediante aforos volumétricos. En el anexo A se presentan los datos y la reglilla patronada para el FLA.

Para el análisis de los datos obtenidos se utilizaron métodos estadísticos como son: análisis por tendencia central, estadística básica y análisis de curvas de pérdida de carga.

5.3 DESARROLLO DEL OBJETIVO II

Se midió el contenido de materia orgánica a la entrada y salida de las diferentes unidades de tratamiento del sistema. Para ellos se utilizaron los siguientes parámetros: DBO, DQO, Espectrofotometría UV 254 nm.

En la tabla 5.2 se presentan los parámetros, puntos y frecuencias de muestreo.

Tabla 5.2 Parámetros, puntos y frecuencias de muestreo para la medición de materia orgánica.

Parámetro	Agua Cruda	Salida FGD _i	Salida FGAC	Integrado FGAC	Salida FLA
DQO	2S	2S	2S	2S	2S
DBO	2S	2S	2S	2S	2S
UV 254 nm	2S	2S	2S	2S	2S

S: Semana

5.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El agua cruda proviene de una fuente superficial, la cual en su recorrido recibe las aguas residuales del municipio de Totoró, además de los desechos producto del procesamiento de las hojas de fique.

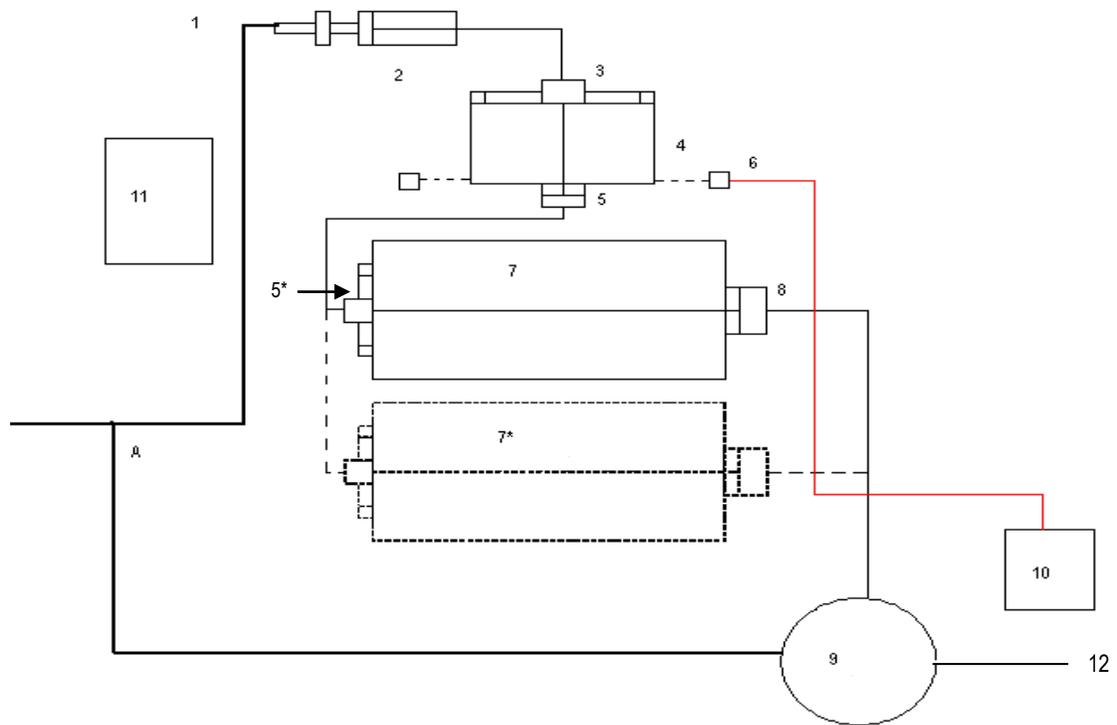
El sistema de tratamiento de agua potable del Corregimiento de la Venta de Cajibío, presenta una capacidad de 8 l/s en el diseño, pero al momento de desarrollar la parte experimental de este proyecto, la planta trabajó a la mitad de su capacidad. En cuanto al sistema como tal, éste se conforma por tres componentes o etapas principales de filtración. Estas son:

- Filtros gruesos dinámicos
- Filtros gruesos ascendentes en capas (dos unidades)
- Filtros lentos en arena (dos unidades).

El filtro dinámico incluye una capa de grava fina en la superficie y otra más gruesa en el fondo, con un total de lecho filtrante de 0.6 m. opera con una velocidad de Filtración de 4.35 m/h. Aunque presenta dos unidades, que operan en paralelo, estas se encuentran comunicadas por el sistema de drenaje, lo cual hace que se pierda la posibilidad de trabajar independientemente.

El sistema cuenta con dos unidades de filtración gruesa ascendente en capas, que operan en paralelo. Cada una de ellas presenta gravas desde 1" a 1/16", con un espesor de lecho total de 1.2 m. La velocidad de filtración es de 0.60 m/h. Las unidades están acondicionadas con válvulas de apertura rápida conectadas al sistema de drenaje que permiten su lavado hidráulico de fondo. Dos unidades de filtración lenta en arena han sido construidas, dos más fueron proyectadas y su construcción se inició a finales del 2004, actualmente terminadas, pero no en funcionamiento. Las unidades en operación funcionan a una velocidad de filtración de 0.16 m/h, por lo cual la mitad del agua cruda es enviada directamente al tanque de almacenamiento.

Figura 5.1 Esquema general de la planta FiME de La Venta Cajibío.



- A: Llegada de agua del canal de captación y distribución al tanque de almacenamiento y planta de tratamiento
- 1: Entrada de agua cruda al filtro grueso dinámico
- 2: Filtros Gruesos Dinámicos
- 3: Cámara de distribución a Filtros Gruesos Ascendentes en Capas
- 4: Filtros Gruesos Ascendentes en Capas
- 5: Cámara de recolección del efluente del FGACS (Integrado)
- 5*: cámara de distribución a los FLAs y Vertedor de Aforo
- 6: Cámara de desagüe del FGAC
- 7: Filtros Lentos en Arena
- 7*: Filtros Lentos en Arena Proyectados
- 8: Cámara de salida del efluente de los FLAs
- 9: Tanque de Almacenamiento
- 10: Caseta para lecho de secado
- 11: Caseta de almacenamiento de Arena
- 12: Hacia el sistema de Distribución
- : Desagüe.

5.4.1 Parámetros de diseño y dimensiones del FGD_i, FGAC y FLA. En la tabla 5.3 se presentan algunos de los parámetros de diseño y dimensiones del FGD_i, FGAC y FLA de la planta FiME de La Venta Cajibío.

Tabla 5.3 Parámetros de diseño y dimensiones del FGD_i, FGAC y FLA de la planta de tratamiento.

Ítem	FGD _i	FGAC	FLA
Largo (m)	3,45	4,9	9
Ancho (m)	1,92	4,9	5
Área superficial (m ²)	6,62	24	45
Número de unidades en paralelo	1	2	4
Velocidad de filtración en diseño (m/h)	4.35	0,60	0,16
Caudal a tratar por unidad (l/s)	8,0	4,0	2,0

5.4.2 Análisis Granulométrico del Lecho Filtrante del FLA. La distribución de tamaños y granos de arena con la cual operó el FLA se evaluó a partir del análisis granulométrico para una muestra de este material, para el cual se obtuvo un coeficiente de uniformidad igual a 3.75 y un diámetro efectivo d_{10} igual a 0.22 mm. por lo cual se concluye que la arena usada se encuentre dentro de lo recomendado por la literatura, ya que ésta expresa que el coeficiente de uniformidad debe ser menor a 5 y preferiblemente entre 2 y 4, y con un diámetro efectivo entre 0.15 y 0.30 mm., (Di Bernardo y Escobar, 1996; Galvis, Latorre, y Vischer, 1999). Los datos y la curva del análisis granulométrico se encuentran en el anexo B.

5.5 MÉTODOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Los ensayos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se hicieron de conformidad con las normas del Standard Methods y se resumen en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Metodología utilizada para la realización de los ensayos en Parámetros Físico- Químicos y microbiológicos.

PARÁMETRO	EQUIPO	METODO
Turbiedad	Utilizando espectrofotómetro HACH DR 2010 el cual esta adaptado al ISO 7027	2130B*
Color Real	Centrifugando la muestra a 3700 rpm durante 15 minutos y midiendo absorbancia en un espectrofotómetro HACH DR 2010 a 455 nm	2120C*
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Lectura de oxígeno disuelto en el día cero e incubando la muestra en winklers por 5 días	2210B*
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Calentando la muestra en un reactor marca HACH por un periodo de tiempo de 2 horas y midiendo absorbancia en un espectrofotómetro HACH DR 2010 a 420 nm y ajustando el resultado a la curva de calibración realizada para este parámetro.	5220D*
UV254 nm	Centrifugando la muestra a 3700 rpm por 15 minutos y midiendo absorbancia en un espectrofotómetro Intralab DMS 100 el cual utiliza celdas de cuarzo.	5910B*
-pH-	Medición directamente en el agua con un pH HANDY LAB	4500H*B*
Coliformes Fecales	Filtración por membrana usando como medio M Endo Agar Les. Con un periodo de incubación de 24 horas a una temperatura de 35.5 ° C	9222D*

*Numeral del Standard Methods.

5.5.1 Pérdidas de Carga. La evaluación de las pérdidas de carga tanto en el filtro grueso ascendente en capas como en el filtro lento se realizó por medio de un piezómetro, el cual medía la diferencia de altura del agua entre la entrada y la salida de cada filtro. Dichas medidas se realizaron dos veces a la semana desde el inicio hasta el final de la fase experimental de este proyecto.

Para la medición de la pérdida de carga del filtro ascendente en capas se procedió de igual forma a la realizada en el filtro lento con la diferencia que en éste, la variación de niveles del agua se presentó en la cámara de entrada a dicho filtro.

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los datos obtenidos durante la fase experimental del proyecto **Estudio de la Remoción de Materia Orgánica en Sistemas de Tratamiento con Filtración en Múltiples Etapas en un Ambiente Tropical**, que se realizó entre el 11/03/2005 y el 04/05/2005 en la que fueron determinados los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos e hidráulicos (pérdida de carga), para las condiciones de funcionamiento propias de la planta, así como también del agua cruda, a la cual se le realizó una clasificación teniendo como referencia el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS – 2000, se presenta de la siguiente manera:

- Calidad del agua cruda
- Comportamiento de caudales
- Parámetros Fisicoquímicos
 - Comportamiento de los Parámetros Fisicoquímicos.

- Parámetros Microbiológicos
 - Coliformes Fecales

- Parámetros Hidráulicos
 - Duración de la carrera de filtración y
 - Comportamiento de la pérdida de carga

6.1 CALIDAD DEL AGUA CRUDA

En la tabla 6.1 se presenta la estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos correspondientes a los diferentes muestreos realizados al agua cruda de la planta de tratamiento que se abastece del río Cofre. Los datos completos de todos los parámetros se presentan en los Anexos C - I.

Tabla 6.1 Estadística descriptiva de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para el agua cruda a la entrada de la planta.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	PARÁMETRO					
	Turbiedad (UNT)	Color real (UC)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	UV 254 nm (cm ⁻¹)	Coliformes Fecales (UFC/100ml)
Promedio	25,3	35,0	3,1	9,5	0,09	3679
Desviación Estándar	35,8	37,2	2,5	9,0	0,04	2996
Máximo	157,0	145,0	7,0	36,0	0,22	12850
Mínimo	4,0	5,0	0,5	1,8	0,05	550
No de Datos	17	17	11	15	17	17

Al comparar la DBO expresada en la tabla 6.1 con los rangos de la tabla 6.2 (RAS 2000), la cual presenta la clasificación de los niveles de calidad de las fuentes de abastecimiento, se puede afirmar que las aguas del río Cofre que sirve como fuente abastecedora al acueducto de la Venta Cajibío, se clasifica como deficiente con tendencia a muy deficiente por presentar altos contenidos de materia orgánica natural, color y coliformes fecales en el rango especificado para este tipo de agua.

Se debe tener presente que el río Cofre, nace en una zona del departamento influenciada por la cordillera central colombiana que pertenece a la cadena montañosa de los Andes de marcada actividad volcánica, lo que favorece la presencia de sustancias húmicas disueltas en sus aguas.

Sobre el parámetro de absorbancia UV 254 nm, el promedio que se reporta para el agua cruda del río Cofre es de 0.09 cm⁻¹, al comparar este valor con datos de fuentes abastecedoras de sistemas municipales en Estados Unidos consideradas con altos contenidos de materia orgánica natural en el rango de 0.05 – 0.08 cm⁻¹ Ashland, New Haven (Collins, et al 1994), se puede decir que para valores en el rango de UV mencionados anteriormente se presenta realmente un riesgo por presencia de materia orgánica natural.

Tabla 6.2 Clasificación de los niveles de calidad de las fuentes de abastecimiento en función de parámetros mínimos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos, (RAS 2000).

Parámetros	Nivel de calidad de acuerdo al grado de polución			
	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
DBO 5 días				
Promedio mensual mg/L	≤ 1.5	1.5 - 2.5	2.5 – 4	>4
Máximo diario mg/L	1 – 3	3 – 4	4 – 6	>6
Coliformes totales (NMP/100 mL)				
Promedio mensual	0 – 50	50 – 500	500 – 5000	> 5000
Oxígeno disuelto mg/L	≥ 4	≥ 4	≥ 4	< 4
PH promedio	6.0 – 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	< 2	2 – 40	40 – 150	≥ 150
Color verdadero (UPC)	< 10	10 -20	20 – 40	≥ 40
Gusto y olor	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)	< 50	50 – 150	150 – 200	300
Fluoruros (mg/L – F)	< 1.2	< 1.2	< 1.2	> 1.7

Los coliformes fecales registrados en promedio para el agua cruda del río Cofre es de 3679 UFC/100 ml, con un máximo de 12850 UFC/100 ml. Estos valores que según el RAS califican la fuente como deficiente, contribuyen a que las aguas captadas de la misma generen un alto riesgo microbiológico, aun si se trata por sistemas como FiME

Uno de los motivos que contribuye significativamente para que la fuente se catalogue de esta manera, son las descargas de aguas residuales de la cabecera municipal del municipio de Totoró sin ningún tipo de tratamiento y la producción de fogueo a lo largo de la cuenca, situación que se pudo evidenciar de acuerdo a la inspección sanitaria realizada el día 03/03/2005.

En la tabla 6.3 se tienen los valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del río Cofre a la salida de la cabecera municipal del municipio de Totoró y a la entrada al canal de captación, obtenidos de la inspección sanitaria antes mencionada. El primer punto de muestreo se realizó 100 m aguas abajo de la descarga de aguas residuales después del puente de la carretera que conduce a Silvia y el segundo en la entrada al canal de captación como tal.

Tabla 6.3 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a la salida de la cabecera municipal de Totoró y Entrada al canal de captación.

Parámetro	Salida Totoró	Entrada canal de captación
Color (UC)	33	51
Turbiedad (UNT)	11	13
DBO (mg/l)	38,4	2,4
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	25000	2250

La alta contaminación con materia orgánica biodegradable y fecal observada durante la inspección en el sitio, salida de Totoró, expresada como DBO y coliformes fecales, va disminuyendo gradualmente por el efecto de dilución y mezcla a medida que el río va adquiriendo mayor caudal, haciéndose menor en el punto de captación del acueducto, como se muestra en la tabla 6.3. En lo que respecta al color y la turbiedad hay un aumento gradual debido probablemente a las condiciones morfológicas de la cuenca en donde se presenta una acentuada actividad agrícola.

Por las razones antes expuestas las aguas del río Cofre que abastece el sistema de acueducto de La Venta Cajibío se cataloga como una fuente DEFICIENTE (RAS, 2000).

Según el RAS 2000, para que el agua de esta fuente sea apta para el consumo humano se debe tratar mediante un sistema de potabilización en el que se tengan como mínimo las siguientes etapas de tratamiento: fase de Pretratamiento seguida de una de Coagulación con Sedimentación más Filtración Rápida o hacer Filtración Lenta en Diversas Etapas. En fin, el método debe ser capaz de llegar a los límites de detección requeridos.

Para este caso, el agua cruda es tratada utilizando el sistema de filtración en múltiples etapas.

6.2 COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL

Durante la carrera de filtración se hicieron mediciones de caudal para dos unidades de la planta de tratamiento, las cuales son: filtro grueso ascendente en capas y filtro lento en arena, esto porque en los objetivos de la fase experimental se propuso mantener la línea de estudio operando a un caudal constante de 2 l/s,

teniendo en cuenta que las unidades mencionadas poseen un sistema de aforo instalado consistente en un vertedero triangular, se facilitó la toma de los datos aun cuando no se logró mantener un estricto control sobre los mismos, por razones que se expondrán mas adelante.

En la tabla 6.4 se presenta la estadística descriptiva del comportamiento del caudal y de la tasa de filtración del FGAC y FLA, los datos completos se reportan en el anexo J.

Tabla No 6.4 Estadística descriptiva del comportamiento de caudal y tasa de filtración de las unidades de FGAC y FLA durante la carrera de filtración.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA	UNIDAD			
	FGAC		FLA	
	Caudal (l/s)	Tasa de filtración (m ³ / m ² . h)	Caudal (l/s)	Tasa de filtración (m ³ / m ² . h)
Promedio	2,2	0,32	2,4	0,19
Desviación Estándar	0,63	0,09	0,51	0,04
Máximo	3,9	0,59	3,4	0,27
Mínimo	1,2	0,18	1,6	0,13
No de Datos	17	17	17	17

En el desarrollo de la fase experimental del proyecto, se operó el filtro grueso ascendente con un caudal promedio de 2.2 l/s, llegando a tener un caudal máximo de 3.9 l/s y un mínimo de 1.2 l/s, lo que evidencia la dificultad de mantener constante el valor de caudal en esta unidad pues como ya se mencionó el objetivo era trabajar con un caudal promedio de 2 l/s durante toda la carrera de filtración, sin embargo como lo muestra la tabla 6.5, el promedio se mantuvo cercano a los 2 l/s.

Una razón por la cual se presentó la variación del caudal en el FGAC y también en el FLA, fue que durante la fase de muestreo en la planta de tratamiento se estaban construyendo dos unidades más de filtración lenta lo que hizo que en la planta se utilizara el agua para los requerimientos de la obra.

La velocidad de filtración promedio que se encontró para el FGAC fue de 0.32 m/h, la cual difiere de la del diseño, pues ésta es de 0.6 m/h. Esta velocidad es más baja debido a que a la planta tiene una derivación del caudal de entrada al filtro grueso dinámico de 4.0 l/s, tal como se muestra en la figura 5.1, esto conlleva

a que las unidades que se tienen trabajen con la mitad del caudal de diseño provocando una reducción en la tasa de filtración, comparada con la considerada en el diseño. La derivación se lleva a cabo para poder suplir la demanda de agua de la población que recibe el servicio de acueducto, sin embargo no se tiene en cuenta que al mezclar el agua tratada con el agua cruda se presenta el riesgo de adquirir enfermedades por esta vía.

Dado que el efluente de los filtros gruesos es recolectado y redistribuido a los FLA, el caudal tratado por el FLA en evaluación es independiente del tratado por el FGAC. En este sentido, la unidad de filtración lenta, en evaluación, operó con un caudal promedio de 2.4 l/s, con un máximo de 3.4 l/s y un mínimo de 1.6 l/s, expresando las dificultades de mantener un caudal constante por lo anteriormente mencionado. Este caudal promedio es mayor que el considerado en el diseño, lo cual generó un incremento en la velocidad de filtración.

La velocidad de filtración promedio hallada en FLA fue de 0.19 m/h, la cual resultó mas alta que la del diseño (0.16 m/h), lo que puede implicar que haya una mayor penetración de impurezas a remover y por consiguiente, un incremento en la frecuencia de limpieza del lecho filtrante (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). Adicionalmente, aunque la tasa de filtración se mantiene en el rango recomendado por la literatura, (0.1 -0.30 m³/m²/h) (Galvis, Latorre y Visscher, 1999) y (Visscher et al, 1987), esta aun puede ser muy alta acorde con los criterios de selección de FiME, presentados por Galvis, 1999.

Según esos mismos criterios, la implementación de la tecnología FiME para tratar un agua cruda con las características de la del río Cofre, requiere que en la planta se utilicen un mayor número de barreras de tratamiento para garantizar una calidad del efluente acorde a los requerimientos de la normatividad colombiana vigente (MinSalud, decreto 475/1998). En este sentido la selección recomendada para el sistema de tratamiento es una combinación de un filtro grueso dinámico con una velocidad de filtración de 1.5 m/h, un filtro grueso ascendente en serie de tres etapas FGAS3 con velocidades de filtración de 0.3 m/h y una unidad de filtración lenta en arena que opere a una velocidad de 0.15 m/h.

Para el caso de la planta FiME de la Venta, no se cumple a cabalidad con estos requerimientos, pues en ella se cuenta con dos unidades de filtración gruesa ascendente en capas diseñadas para operar con una velocidad de filtración de 0.60 m/h, valor que es mucho mayor al recomendado en la literatura e igual a 0.3 m/h (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). Con las condiciones de operación de la etapa experimental las unidades de FGAC trabajaron en paralelo con la mitad del caudal de diseño logrando mantener una tasa de filtración cercana a la

recomendada, sin embargo cuando la planta empiece a trabajar a caudal completo, es decir 8 l/s, se podría afirmar que el efecto producido en el efluente es que este no tenga las características recomendadas para el ingreso a la siguiente etapa de tratamiento.

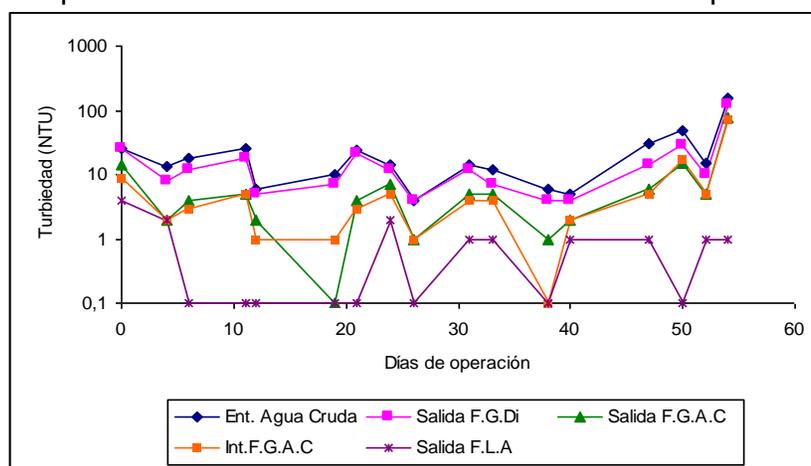
6.3 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS

6.3.1 Turbiedad. En la tabla 6.5 se presenta la estadística descriptiva de la turbiedad en lo que respecta a cada punto de muestreo, y en la figura 6.1 se observa el comportamiento de éste parámetro durante la carrera de filtración. La totalidad de los datos obtenidos se muestran en el Anexo D.

Tabla 6.5 Estadística descriptiva de la turbiedad para cada punto de muestreo

PARÁMETRO	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	PUNTOS DE MUESTREO				
		AGUA CRUDA	SALIDA FGD _i	SALIDA FGAC	INTEGRADO FGAC	SALIDA FLA No 1
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	25,3	18,5	9,2	8,2	0,8
	Desviación Estándar	35,8	27,7	18,4	17,2	1,1
	Máximo	157,0	122,0	79,0	73,0	4,0
	Mínimo	4,0	4,0	0,0	0,0	0,0
	No de Datos	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
	Eficiencia (%)	-	27	50,0	-	90,0
	Eficiencia acumulada (%)		27	63,6	-	96,7

Figura 6.1 Comportamiento de la Turbiedad en los diferentes puntos de muestreo.



Durante la etapa experimental, los valores encontrados mostraron que el FGD_i redujo el contenido de turbiedad en un 27%, con respecto al agua cruda. De acuerdo con la literatura esta eficiencia se encuentra por debajo de la reportada para esta unidad y esta calidad de agua, pues la eficiencia típica para esta etapa en fuentes de ladera en Colombia es aproximadamente del 50% (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). Una de las razones por la cual se pudo presentar ésta menor eficiencia es debido a la naturaleza, tamaño y distribución de las partículas presentes en esta fuente. Otra razón es la marcada presencia de material residual de la actividad de desfibrado de las plantas de Fique, ya que se presume que el material retenido en el filtro al momento de degradarse puede conllevar a la formación de partículas muy finas que el filtro no puede retener.

En el FGAC la eficiencia de remoción de material particulado medido como turbiedad fue del 50%, rango aceptable según lo expresado en la literatura cuyo rango oscila entre 50 - 90% (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). Si se tiene en cuenta que la eficiencia encontrada para ésta unidad esta en el menor valor del rango de eficiencias mencionado, se podría decir que el FGAC estudiado no alcanzó una mayor eficiencia pues durante la fase experimental esta unidad operó con un caudal y una velocidad de filtración menores a las del diseño, situación en la cual se esperaría un incremento en las eficiencias de remoción de turbiedad.

Esto pudo darse presumiblemente por el tipo, tamaño y naturaleza de las partículas que estuvieron ingresando al filtro. En este sentido, la situación encontrada en la cuenca respecto a los desechos de la producción de fique arrojados a la fuente probablemente tuvo un efecto importante ya que la fibra de esta planta tiene un diámetro promedio de 215 μm (Fernández, Muñoz y Latorre, 2000), tamaño que todavía alcanza a ser retenido en el FGAC; mientras que las partículas mas finas, que se presumen son producto del proceso de descomposición de la fibra, si logran traspasar el lecho filtrante de esta unidad.

Los resultados mostraron que las unidades antes mencionadas redujeron gradualmente la carga de turbiedad de entrada al FLA en un 63.6%, y este produjo un efluente con una turbiedad promedio de 0.8 UNT, tal como se presentó en la tabla 6.5.

Las unidades de filtración anteriores a FLA produjeron en promedio agua con turbiedades menores de 10 NTU, lo cual ayudó a prevenir una obstrucción prematura del FLA. Se observó que no importa cuan alta sea la turbiedad del afluente al FLA, el efluente filtrado de éste permanece por debajo de 1 NTU ó menos en promedio. Esto demuestra que el efluente obtenido del sistema de tratamiento es apropiado para aplicarle desinfección terminal de manera confiable

(Galvis, Latorre y Visscher, 1999) y además, se cumple con las Normas de Calidad de Agua Potable para Colombia, cuyo valor admisible es de 5 UNT (MinSalud, decreto 475/98).

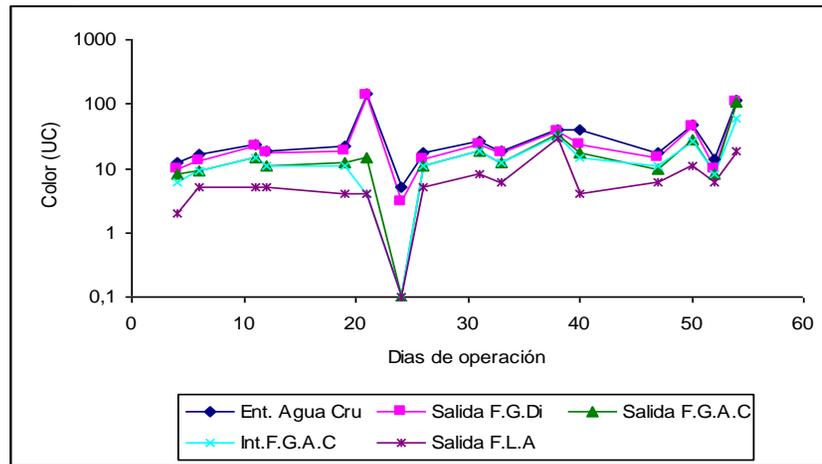
Por lo expuesto anteriormente se puede deducir que la turbiedad no tuvo un gran impacto sobre la carrera de filtración debido a que durante la mayor parte de la misma los valores en promedio con que llegó el agua a la unidad de FLA no superaron el límite de 10 UNT recomendado por Hendricks en 1991., además como se pudo evidenciar en la figura 6.1 desde el inicio hasta los días previos al final de la carrera de filtración el contenido de turbiedad de entrada a FLA no presentó valores muy elevados, no siendo igual en el último día de la carrera en el que se presentó un máximo de 73 UNT lo cual ayudo a la obstrucción del filtro pues la capacidad de los filtros lentos para reducir turbiedad cuando ésta es muy elevada es limitada. Ello se debe a que una alta turbiedad causa enlodamiento en la superficie del filtro, disminuye la capacidad de formación de la capa biológica y reduce drásticamente la carrera de filtración lo cual además de afectar la calidad del agua producida, incrementa los costos de operación y mantenimiento (Solsano y Méndez, 2000).

6.3.2 Color Real. El desempeño del sistema de tratamiento en cuanto a la remoción de color real se presenta en la tabla 6.6 y la figura 6.2. El total de los datos se presenta en el anexo E.

Tabla 6.6 Estadística descriptiva del color real para cada punto de muestreo

PARÁMETRO	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	PUNTOS DE MUESTREO				
		AGUA CRUDA	SALIDA FGDi	SALIDA FGAC	INTEGRADO FGAC	SALIDA FLA No 1
COLOR (UC)	Promedio	35,0	31,4	18,5	14,9	7,2
	Desviación Estándar	37,2	36,3	23,7	14,3	6,9
	Máximo	145,0	137,0	105,0	61,0	29,0
	Mínimo	5,0	3,0	0,0	0,0	0,0
	No de Datos	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
	Eficiencia (%)	-	10,4	40,9	-	51,9
	Eficiencia acumulada (%)	-	10,4	47,1	-	79,4

Figura 6.2 Comportamiento del Color real en los diferentes puntos de muestreo.



Durante el periodo de evaluación de la planta de tratamiento, el agua cruda presentó un color promedio de 35 UC. De acuerdo a la clasificación de la calidad del agua en fuentes superficiales presentada por Galvis, Latorre y Visscher, 1999, para la selección de FiME como alternativa de tratamiento, este valor representa que las aguas del río Cofre se cataloguen como de alto riesgo (color entre 30 y 40 UC), es decir, fuentes que reciben vertimientos de aguas residuales y aguas de escorrentía superficial de zonas agroindustriales. Para ésta calidad de agua las unidades de filtración gruesa dinámica y filtración gruesa ascendente en capas presentaron valores promedio de color en sus efluentes de 31,4 y 18,5 UC respectivamente.

El valor promedio logrado en el FGD_i presentó una eficiencia de remoción respecto al contenido de color en el agua cruda de 10.4 %. Aunque el objetivo de FGD_i es remover sólidos suspendidos de gran tamaño los cuales no se asocian directamente con el color, de acuerdo a los datos ésta unidad alcanzó a retener una pequeña proporción de materia orgánica disuelta, pues presumiblemente la fuente presenta altos contenidos de este tipo de material que si está asociado al contenido de color en el agua.

La reducción obtenida en la etapa de pretratamiento al FLA, presentó una eficiencia acumulada de 47.1%, estos resultados muestran que el pretratamiento (FGD_i + FGAC), alcanzó a producir un efluente con contenidos de color del orden de 14.9 UC en el punto integrado de los filtros gruesos ascendentes, en el cual se redistribuye el caudal para la etapa de filtración lenta.

En el filtro lento en arena la eficiencia de remoción de color fue de 51.9% resultando ser mayor a la reportada por Cleasby et al, 1984; Ellis, 1985 y Collins Et al, 1991; que esta en el orden del 25 al 30%, esto debido probablemente a la presencia de materia orgánica biodegradable la cual es degradada por las bacterias presentes en la capa biológica que se forma en la superficie del lecho filtrante. El promedio de color en el efluente de esta unidad fue de 7.2 UC, lo cual es un valor admisible dentro de la normatividad colombiana de calidad de agua para consumo humano que reporta un valor de 15 UC (Minsalud, Decreto 475/1998), por lo tanto en las condiciones de operación del sistema se puede decir que el tratamiento aporta agua con calidad aceptable para la aplicación de desinfección terminal, por el bajo riesgo de la formación de subproductos potencialmente peligrosos asociados a las reacciones de la materia orgánica con los desinfectantes.

En la figura 6.2 se pudo observar el comportamiento del color real durante la carrera de filtración en los diferentes puntos de muestreo, en ésta se muestra que al presentarse picos en el afluente, el sistema presenta limitaciones en la remoción de este parámetro debido posiblemente a la presencia de materia orgánica coloreada representada por ácidos fúlvicos y húmicos. Es de anotar que el máximo presentado se obtuvo al realizar el muestreo, cuando sobre la fuente abastecedora han llegado gran cantidad de desechos como jugos, fibra, entre otros procedentes de la actividad figuera.

6.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Absorbancia UV 254 nm. En general, el funcionamiento encontrado en la planta FiME de la Venta en cuanto a parámetros de DBO; DQO Y UV 254 nm se presentan en la tabla 6.7. En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se observan los comportamientos de los parámetros antes mencionados. La totalidad de los valores obtenidos se presentan en los anexos del F-H.

Tabla 6.7 Estadística descriptiva de la calidad del agua para cada punto de muestreo respecto a los parámetros DBO, DQO y UV 254 nm.

PARÁMETRO	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	PUNTOS DE MUESTREO				
		AGUA CRUDA	SALIDA FGD _i	SALIDA FGAC	INTEGRADO FGAC	SALIDA FLA No 1
DBO (mg/l)	Promedio	3,07	2,32	1,19	1,60	0,37
	Desviación Estándar	2,50	2,12	0,97	1,45	0,41
	Máximo	6,96	7,02	3,48	5,40	1,26
	Mínimo	0,50	0,55	0,12	0,12	0,10
	No de Datos	11,0	11,0	12,0	12,0	11,0
	Eficiencia (%)	-	24,4	48,7	-	77,0
	Eficiencia acumulada (%)	-	24,4	61,2	-	88,0
DQO (mg/l)	Promedio	9,5	8,15	2,95	4,26	2,21
	Desviación Estándar	9,0	8,96	2,28	2,18	1,15
	Máximo	36,0	37,5	8,6	8,5	5,4
	Mínimo	1,8	1,16	0,52	1,31	1,2
	No de Datos	15,0	15,0	14,0	14,0	11,0
	Eficiencia (%)	-	14,3	63,8	-	48,18
	Eficiencia acumulada (%)	-	14,3	69,0	-	76,8
factor de biodegradabilidad (fb)*		0,50	0,44	0,62	0,58	0,26
UV 254 nm (cm ⁻¹)	Promedio	0,094	0,089	0,077	0,081	0,048
	Desviación Estándar	0,036	0,039	0,032	0,042	0,015
	Máximo	0,218	0,231	0,198	0,216	0,088
	Mínimo	0,047	0,045	0,057	0,033	0,029
	No de Datos	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
	Eficiencia (%)	-	5,3	14	-	41
	Eficiencia acumulada (%)	-	5,3	18	-	49

* *Formula para el calculo del factor de biodegradabilidad: $fb = DBO_5 / (0.65 * DQO)$. El 0.65 hace referencia a las correcciones por interferencias al determinar los parámetros, DBO y DQO, e igualmente porque la DBO no se calcula como DBO ultima (Rojas, 2004).*

Figura 6.3 Comportamiento de la DBO en los diferentes puntos de muestreo.

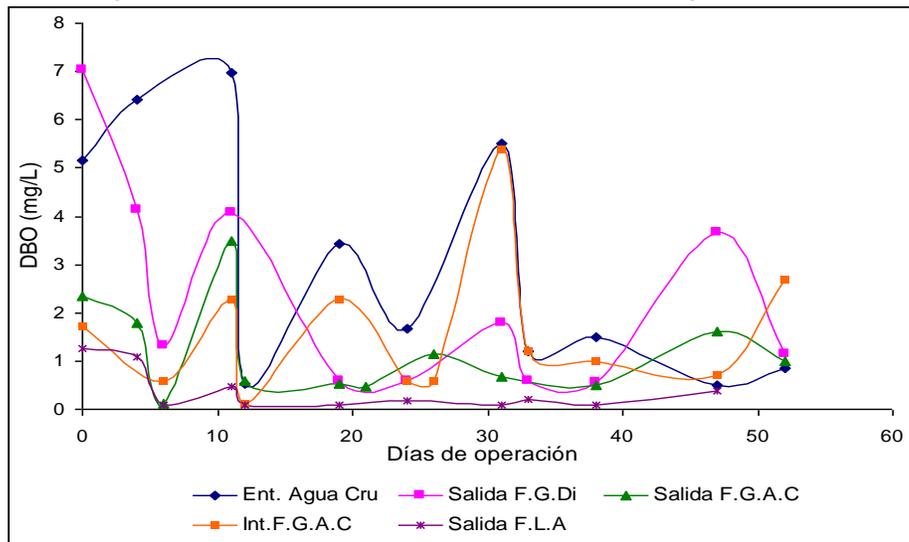


Figura 6.4 Comportamiento de la DQO en los diferentes puntos de muestreo.

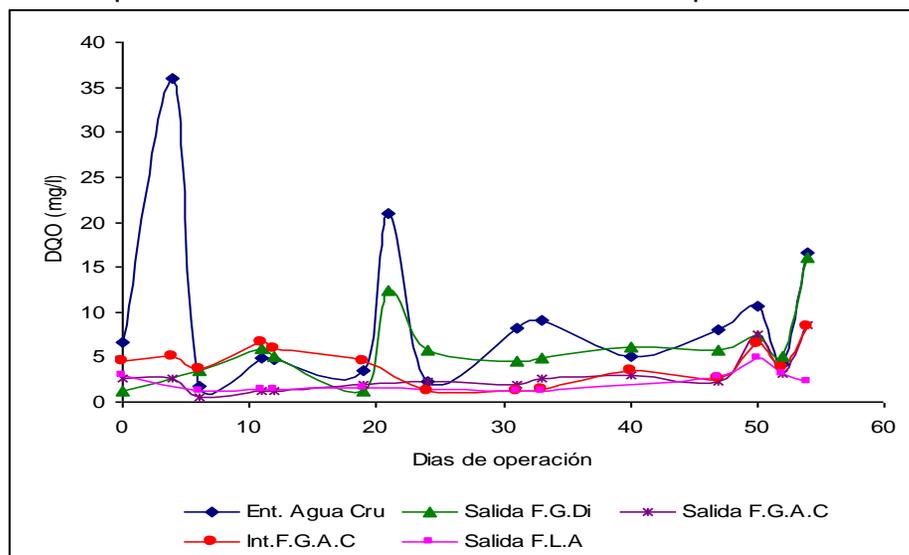
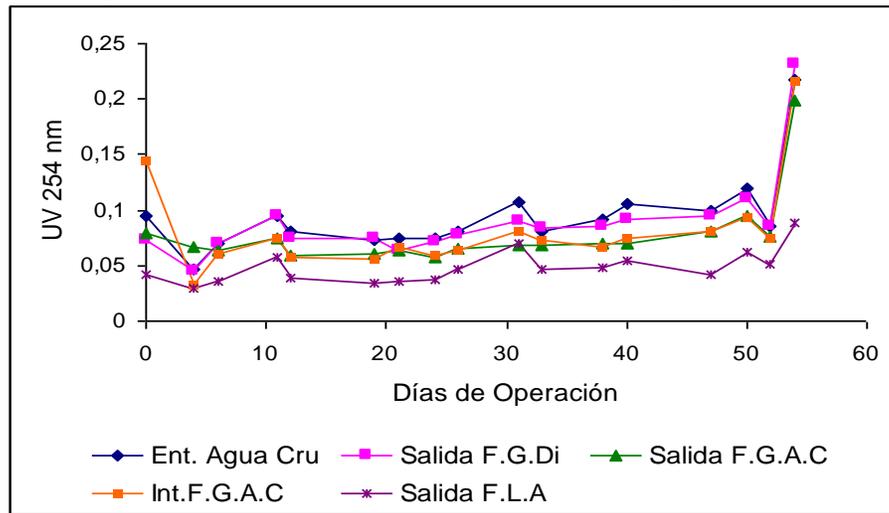


Figura 6.5 Comportamiento de UV254 en los diferentes puntos de muestreo.



Tal como se mencionó en la sección 6.1, el agua cruda que abastece el acueducto de la Venta presentó altos contenidos de materia orgánica natural (MON), siguiendo el mismo comportamiento para los contenidos de turbiedad, color y coliformes fecales.

Debido a la elevada contaminación de la fuente, se hace necesario la implementación de barreras de tratamiento más robustas para garantizar un mayor nivel de potabilización en el agua (Galvis, Latorre y Visscher, 1999). Éstas ayudan a obtener mayores eficiencias de remoción en la mayoría de los parámetros de evaluación de la calidad del agua. Para el caso estudiado la eficiencia de remoción alcanzada en la etapa de pretratamiento al filtro lento en arena en cuanto a DBO, DQO y UV 254nm fue de 61.2, 69.0 y 18% respectivamente lo que indica que dentro de las unidades que componen esta etapa (FGDi + FGAC), ocurren procesos que ayudan que la materia orgánica biodegradable y no-biodegradable sea retenida por los medios filtrantes, estos procesos son de naturaleza física principalmente siendo la adsorción el predominante (Davis y Gloor, 1981; Schneider et al, 1984).

Para el filtro lento en arena se lograron eficiencias de remoción de 77.0 y 41% en los parámetros de DBO y UV 254 nm respectivamente, siendo los porcentajes mas altos entre todas las unidades del sistema de tratamiento, esto seguramente porque en FLA existe una preferencia por retener fracciones específicas de material orgánico (Collins, et al 1994). Es de destacar que para ésta unidad a diferencia de las otras, se presenta otro importante factor que contribuye a la reducción de la MON además de la adsorción, este es el proceso de

biodegradación que se origina principalmente sobre el lecho filtrante al interior de la capa biológica. En conjunto, la adsorción que se encarga de quitar grandes moléculas orgánicas hidrofóbicas / húmicas (Davis y Gloor, 1981; Schneider et al 1984), y la biodegradación responsable de la eliminación de las moléculas orgánicas más pequeñas (de Haan, 1977; Meyer et al 1987), provocan las altas eficiencias de remoción de MON en el FLA.

Otra consideración importante a tener en cuenta es que el material hidrofílico mas pequeño como carbohidratos, aldehídos y ácidos orgánicos simples, son mas favorables al proceso de biodegradación, mas no sucede lo mismo con el material húmico (Thurman, 1985), siendo posiblemente la razón por la cual aun se reportaron bajos contenidos de materia orgánica medida como DBO y UV 254 nm en el efluente del sistema de tratamiento.

La relación DBO/DQO encontrada para el agua cruda, demostró que en ésta existe una proporción de MON biodegradable casi igual a MON no biodegradable según el valor reportado para el factor de biodegradabilidad (fb) en la tabla 6.7, el cual fue igual a 0,50, y que al ser filtrada el agua por la unidad de FGDi, la MON biodegradable es reducida a un 0,44. Un hecho que contribuye a que la MON biodegradable se haya aumentado en la salida de FGAC (0,62) evaluado es la presencia de algas pues, éstas formas microscópicas que flotan libremente son los principales productores de materia orgánica en los volúmenes de agua en la naturaleza y convierten la energía de la luz solar en materia orgánica celular, que es usada como alimento por protozoos, crustáceos y peces (Rittman y McCarty, 2001).

Al ser redistribuido el caudal se tuvo que la presencia de MON biodegradable que estuvo entrando al FLA presentó un factor de biodegradabilidad de 0.58, indicando que existe un gran porcentaje de materia biodegradable que no alcanzó a ser retenida por las barreras previas a FLA, en donde se presentó la mayor reducción.

Es de mencionar que un fb alto proporciona mayor suministro de sustrato para el buen desarrollo de la capa biológica en el lecho filtrante del FLA. El fb del efluente del FLA de 0.26 demostró que en esta fase del tratamiento existió una reducción de MON biodegradable pero que existen sustancias que aun siendo biodegradables logran pasar el lecho filtrante para alcanzar el efluente final, al igual que algunas sustancias húmicas que representan la fracción no biodegradable de MON.

Tal como se expresa en la literatura el rendimiento del filtro lento depende principalmente del proceso biológico, mientras la capa biológica esta desarrollándose, la eficiencia es baja y no debe considerarse al FLA como un eliminador de materia orgánica, sino como un mejorador de la calidad del agua sobre todo de la turbiedad.(Solsano y Méndez, 2000), esto se pudo evidenciar para el caso de la Venta donde durante los primeros 5 días se presentó una eficiencia de remoción de MON del 28%, incrementándose en los días posteriores donde esta eficiencia en promedio se mantuvo por encima del 70%. Esta situación se pudo observar en la figura 6.3 en donde el mayor contenido de materia orgánica en el efluente de FLA se presentó en el inicio de la carrera de filtración.

El porcentaje de remoción de materia orgánica biodegradable, medida como DBO, que se encontró en el FLA del sistema evaluado fue del 77 %, que al compararse con monitoreos realizados en dos sistemas de filtración lenta en arena en Ivry y Orly (Francia) donde se reportaron reducciones del carbono orgánico biodegradable en un 70%, a una temperatura media de 8°C (Welte y Montiel, 1996), se puede decir que la mayor remoción del FLA de la Venta pudo ocurrir posiblemente por encontrarse operando a una temperatura promedio de 15°C, lo que permitió que los procesos de adsorción y biodegradación, en especial este último, se mejoren por el incremento substancial de temperatura (Welte y Montiel, 1996).

El mantenimiento de elevados niveles de biomasa en la superficie del FLA incrementa la posibilidad de remoción de MON biodegradable y no biodegradable (Eighmy et al, 1992). Investigaciones realizadas por Huck (1988), Sontheimer et al (1978) y Werner (1984) demostraron que la filtración en arena puede reducir carbono orgánico asimilable en un 40 %. Si se compara este valor con el que se obtuvo en el filtro lento en arena con respecto a la DBO, 77%, los mayores porcentajes de remoción indican que se desarrollaron elevados niveles de biomasa en el filtro lento los cuales son de vital importancia en la remoción de la materia orgánica.

La reducción de materia orgánica natural medida como carbonó orgánico disuelto mediante la UV 254 nm reportó una eficiencia del 48.9% en todo el sistema, que al ser comparada con evaluaciones realizadas en plantas municipales de E.E.U.U donde se obtuvieron reducciones de 17-33% durante condiciones de invierno y del 15–43% en condiciones de otoño (Collins, et al 1994), resulto ser muy significativa, evidenciando así que la filtración lenta en arena en un medio tropical como el Colombiano genera mejores resultados para la remoción de materia orgánica.

El alto porcentaje de remoción en materia orgánica, representada por el carbono orgánico disuelto, que se obtuvo en el FLA estudiado, pudo contribuir al desarrollo de las pérdidas de carga debido a que el potencial de fracciones hidrofóbicas concentradas de MON sirvió indirectamente como sustrato para el crecimiento de las poblaciones elevadas de bacterias (Collins, et al 1994), Sin embargo la carrera de filtración que tuvo una duración de 54 días, no fue sustancialmente afectada por la buena remoción de MON. Situación que se discutirá en el ítem 6.5.1.

De igual manera, estudios realizados en filtros municipales de EE.UU. por Collins, Eighmy y Malley en 1991 sugiere que mantener una capa biológica alta puede contribuir a la remoción de grandes cantidades de precursores formadores de trihalometanos.

En lo relacionado con la velocidad de filtración esta parece no tener una gran incidencia en la eficiencia de remoción de materia orgánica, pues de acuerdo con estudios realizados en Estados Unidos para filtros lentos en arena por Collins, Eighmy y otros en 1994, la materia orgánica contenida en el agua es degradada por la acción intensiva de los microorganismos presentes en el lecho filtrante como son: algas, plancton, diatomeas, protozoarios, rotíferos y bacterias (Cánepa de Vargas, 1999).

6.4 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

6.4.1 Coliformes Fecales. Se analizaron las muestras de agua para determinar la cantidad de coliformes fecales que se pueden encontrar en cada punto de muestreo, para esto se tomaron muestras a la entrada y salida de cada sitio seleccionado para este fin. En la tabla 6.8 se presenta la estadística descriptiva de la calidad del agua y en la figura 6.6 se muestra el comportamiento de los coliformes fecales en cada punto de muestreo. En el anexo I Se presentan los valores obtenidos para este parámetro.

Tabla 6.8 Estadística descriptiva de la calidad del agua para cada punto de muestreo de coliformes fecales.

PARÁMETRO	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	PUNTOS DE MUESTREO				
		AGUA CRUDA	SALIDA FGD _i	SALIDA FGAC	INTEGRADO FGAC	SALIDA FLA No 1
COLIFORMES FECALES (UFC/100 ml)	Promedio	3679	2027	440	474	1,8
	Desviación Estándar	2996	1397	475	413	2,6
	Máximo	12850	5800	2144	1500	11
	Mínimo	550	55	6	6	0
	No de Datos	17	17	17	17	17
	Eficiencia (%) / reducción log.	-	44,9 / 0,26	78,3 / 0,66	-	99,6 / 2,37
	Eficiencia acumulada (%) / reducción log.	-	44,9 / 0,26	88 / 0,92	-	99,95 / 3,26

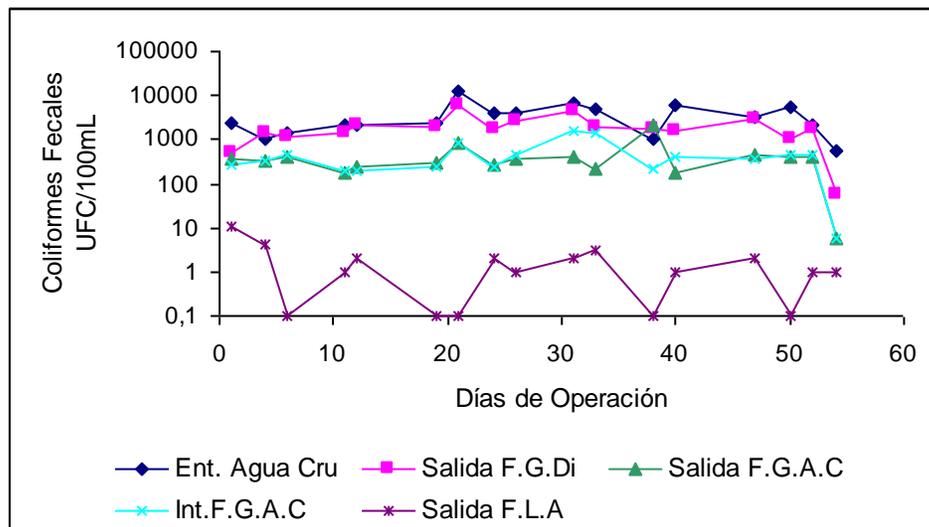
Los resultados obtenidos muestran que el agua cruda que llegó a la planta de tratamiento durante la fase experimental tuvo un promedio de coliformes fecales de 3679 UFC/100 ml, lo que evidencia la baja calidad del agua presentada en la fuente. La alta contaminación presentada por la misma se debe a las razones expuestas en la sección donde se especifica la calidad del agua cruda.

Como se mostró en la tabla 6.6 para la baja calidad del agua, en las unidades de tratamiento previas al FLA se obtuvo una reducción promedio de 88%, ésta es significativa ya que las unidades de FGD_i y FGAC se diseñan principalmente para la remoción de material suspendido, sin embargo en este caso de acuerdo a las eficiencias por unidad de 44.9% y 78.3% en remoción de coliformes fecales para el FGD_i y el FGAC respectivamente, se puede afirmar que estas unidades además de contribuir a la remoción de turbiedad también ayudan a disminuir el efecto de la contaminación por microorganismos patógenos en el agua.

En la misma tabla se puede observar que el efluente del FLA tuvo un promedio de 1.8 UFC/100 ml con un máximo de 11 y un mínimo de cero, lo que evidencia que en este se produce la mayor retención de contaminación microbiológica que afecta la calidad del agua. La gran reducción de esta contaminación se logró debido a la formación y maduración de la capa biológica asociada a la tasa de filtración de la cual se ha demostrado su influencia en la remoción de bacterias y quistes. Bellamy, Hendricks y Logsdon en 1985 encontraron que cuando las demás relaciones en el diseño de FLA están bien definidas, los porcentajes de remoción son uniformemente altos, y que aún con tasas de filtración del orden de 0.40 m/h se obtienen eficiencias apreciables.

En el inicio de la carrera de la filtración el efluente de FLA tuvo un alto contenido de unidades formadoras de colonias (UFC/100 ml) debido a que el filtro fue raspado, lo que indica que mientras no exista una capa biológica bien establecida sobre el lecho de arena existe un alto riesgo de que microorganismos patógenos logren atravesar el lecho filtrante. A medida que transcurre el tiempo el número de UFC/100 ml, fue disminuyendo por la recuperación y maduración de la capa biológica, esto se puede ver en la figura 6.6. Este suceso se mantuvo conforme a lo reportado en la literatura en donde se expresa que a mayor población de algas, protozoos y rotíferos en el medio filtrante, puede haber mayor eficiencia de remoción de coliformes fecales (Sánchez, Latorre y Galvis, 1999).

Figura 6.6 Comportamiento de Coliformes Fecales en los diferentes puntos de muestreo.



El hecho de tener una fuente con altos contenidos de coliformes fecales y tratarla por el sistema de filtración en múltiples etapas hace que el tratamiento alcance altos porcentajes de remoción dado que las barreras pueden volverse mas efectivas si el agua cruda presenta un mayor riesgo y aun así, producir un efluente con bajo riesgo sanitario (Galvis, Latorre, Vischer, 1999). En el caso de la planta FiME de la venta se obtuvieron reducciones de 3.26 unidades Log, logrando concentraciones promedio en el efluente del FLA d e 1.8 UFC/100 ml.

Estos valores están acorde con los reportados por Lloyd y Helmer, en 1991, y por la OMS en 1993, quienes expresan que para cumplir con una desinfección segura el agua debe contener una de turbiedad en promedio menor a 1 UNT y máximo 5UNT y una carga promedio de coliformes fecales menor a 3 UFC/100 ml y con un máximo de 25 UFC/100 ml, por lo tanto la posibilidad de aplicar una

desinfección segura al agua es posible, ya que las demandas de desinfectante son bajas y poco variables, haciendo más económica, confiable y sencilla de operar esta última etapa de tratamiento (Galvis, Latorre y Visscher, 1999).

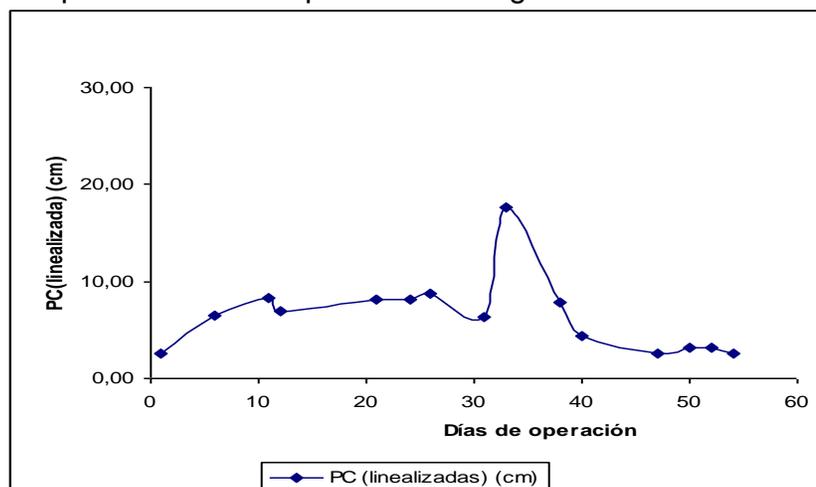
6.5 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

La totalidad de los datos reportados para este ítem se pueden encontrar en los anexos K y L, donde se presentan los valores de pérdidas de carga obtenidos durante la carrera de filtración en las unidades de FGAC y FLA respectivamente.

6.5.1 Duración de la Carrera de Filtración. Para este caso en particular las fechas de inicio y culminación de la carrera de filtración fueron del 11/03/2005 y 04/05/2005 respectivamente, si se entiende la misma como el tiempo transcurrido desde el día en el que se realiza el raspado del FLA hasta el día en el cual éste se rebosa, la carrera para el proyecto realizado en la planta FiME de la Venta tuvo una duración de 54 días. Comparando esta duración con las reportadas por Galvis, Latorre y Visscher en 1999, donde se presentan rangos de duración entre 46 y 178 días, se puede decir que la carrera de filtración tuvo una duración aceptable, de tal forma que no se requirieron labores de mantenimiento muy frecuentes.

6.5.2 Comportamiento de la Pérdida de Carga. En las figuras 6.7 y 6.8 Se muestran los comportamientos de las pérdidas de carga linealizadas en el filtro grueso ascendente en capas y en el filtro lento de arena durante la carrera de filtración.

Figura 6.7 Comportamiento de la pérdida de carga linealizada en el FGAC.

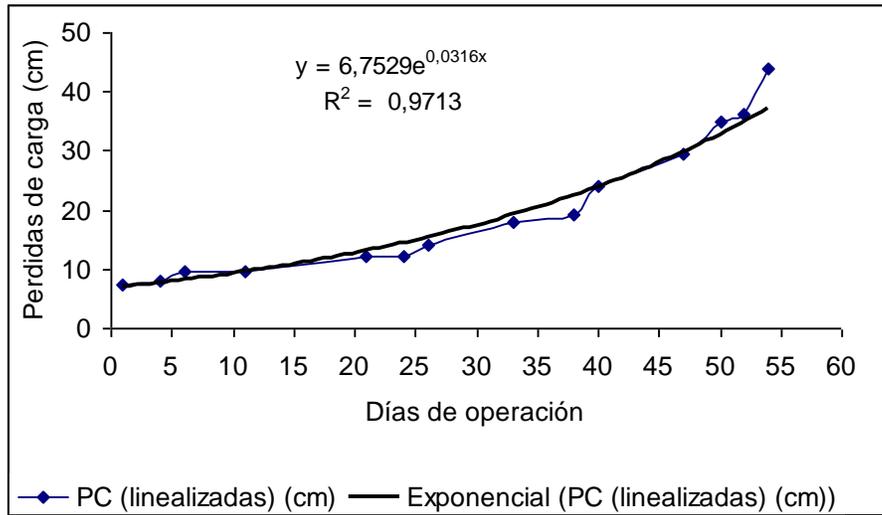


Tal como se pudo observar en la figura 6.7 la pérdida de carga en el FGAC luego de realizársele la limpieza (día 1), presentó un valor de 2.6 cm, éste fue incrementándose a medida que transcurría el tiempo de la fase experimental debido a la colmatación progresiva del medio filtrante llegando a tener un valor máximo de 17.6 cm en un tiempo de operación de 33 días. La razón principal para que el FGAC no sufriera una colmatación en un periodo mas corto, fue que esta unidad no operó con la cantidad de agua para la cual fue diseñada, pues solo trató en promedio 2.2 l/s, además durante esos primeros 33 días de operación al agua que ingresó a la planta no se le observaron variaciones significativas en cuanto a la disminución de su calidad.

Inmediatamente después de que se alcanzó el valor máximo de pérdida de carga en el FGAC, fue realizado el mantenimiento de esta unidad, esto tuvo un marcado efecto ya que a partir este tiempo se pudo observar que las pérdidas de carga disminuyeron drásticamente y no volvieron a presentar variaciones significativas en los días posteriores, pues el mantenimiento a esta unidad se tuvo que hacer con mayor frecuencia debido al visible cambio de turbiedad con que empezó a llegar el agua a la planta de tratamiento.

Pasando al caso del filtro lento en arena, la figura 6.8 muestra que al alcanzar el día 50 (92.6%) de la carrera de filtración, se había desarrollado una pérdida de carga de 35.04 cm (80% aproximadamente), esto pone de manifiesto que durante la mayor parte del tiempo que duró, la carrera de filtración presentó un comportamiento ajustado a un crecimiento exponencial, logrando permanecer del mismo modo en los 4 últimos días donde las pérdidas se elevaron abruptamente por lo mencionado respecto al agua cruda en ese periodo. Los 8.89 cm restantes que corresponden al 20% remanente de pérdida de carga se alcanzaron en esos últimos 4 días. El FLA trató agua con turbiedades entre 0 y 73 UNT durante la duración de la carrera de filtración siendo este ultimo valor el reportado para el día final de la misma.

Figura 6.8 Compartimiento de la pérdida de carga linealizada en el FLA.



Este incremento en la turbiedad del agua presentado el último día de muestreo hizo que la carrera de filtración culminara debido al enlodamiento que pudo presentarse en la superficie del lecho filtrante de la unidad de FLA. Sin embargo es de tener en cuenta que otra causa que pudo influir en el desarrollo de las pérdidas de carga es la tasa de filtración con la cual se operó el filtro. Para este caso siendo una tasa mayor a la del diseño se pudo contribuir a que las pérdidas de carga aumentaran con mayor rapidez y de esta forma disminuyera el tiempo de la carrera de filtración.

El elevado contenido de materia orgánica natural no fue un factor muy importante en la duración de la carrera de filtración pues se mencionó anteriormente, ésta se mantuvo dentro de los rangos aceptables para las condiciones del tratamiento, por lo tanto no se presentaron problemas en cuanto a operación y mantenimiento en la planta de tratamiento.

7. CONCLUSIONES

El agua del río Cofre con la cual se abastece el acueducto de la Venta presenta altos contenidos de materia orgánica y coliformes fecales, por lo que se la clasifica como una fuente deficiente con tendencia a muy deficiente para ser utilizada como fuente abastecedora.

El sistema de tratamiento presentó altas eficiencias de remoción en cada uno de los parámetros evaluados, llegando a obtener valores superiores a los logrados en plantas que utilizan la Filtración Lenta en Arena como una de las etapas de tratamiento, según lo reportado por la literatura.

El alto contenido de materia orgánica en el agua a tratar presumiblemente no generó un gran impacto sobre la carrera de filtración en el FLA, conllevando a que no se presenten problemas en cuanto a operación y mantenimiento en la planta evaluada.

La eficiencia en la remoción de MON es más elevada para las condiciones de un ambiente tropical donde de la temperatura no presenta grandes variaciones en comparación con las plantas evaluadas en ambientes estacionales donde los cambios de temperatura son muy marcados.

La elevada remoción de materia orgánica natural presentada por el sistema de tratamiento garantiza que no se vea afectada la calidad del efluente final el cual es utilizado por la comunidad beneficiaria del servicio de acueducto.

Los bajos contenidos de materia orgánica natural en el efluente final hace que no se presenten riesgos en la formación de trihalometanos al momento de aplicar desinfección terminal al agua tratada, pues en gran parte, la materia orgánica que los puede formar es retenida por las diferentes unidades que componen el sistema.

8. RECOMENDACIONES

Al realizar la evaluación de los resultados obtenidos en el Filtro Lento en Arena que operó con una tasa de filtración de 0.19 m/h, se lograron eficiencias en la remoción de materia orgánica natural, expresada como DBO (77.0%), DQO (48.18%) y UV 254 nm (41%), las cuales están en el rango o un mayor nivel de las reportadas en la literatura, y que produjeron un agua que puede ser considerada de bajo riesgo sanitario, se recomienda evaluar el impacto que puede generar un incremento de las tasas de filtración en la eficiencia de remoción de MON, en la reducción del riesgo microbiológico y los parámetros de operación y mantenimiento.

De igual manera, se recomienda estudiar velocidades de filtración mayores a 0.32 m/h en el Filtro Grueso Ascendente en Capas con el fin de verificar su impacto en la remoción de materia orgánica natural.

BIBLIOGRAFÍA

AIDIS. La crisis mundial del agua - Conferencia de Río". *Ingeniería Sanitaria*, 45(4)/46(1 y 2):15, 1991/1992.

ARRIETA, Geovani. Calidad del Agua en Colombia, Ministerio de Salud, Superintendencia de Servicios Públicos. Documento de Internet en la siguiente Dirección: www.col.ops-oms.org/DIAA/2002/COLOMBIA.pdf. 2002

BELLAMY, W.D; HENDRICKS, D.W. AND LOGSDON, G.S. Slow Sand Filtration: Influences of Some Selected Process Variables. *Journal AWWA*, 77 (12), 62 – 66. USA. 1985.

CÁNEPA DE VARGAS, LIDIA. Filtración lenta y dinámica como desinfectantes. En Simposio regional sobre Calidad del Agua: desinfección efectiva, CEPIS-OPS, Lima, Perú. 1999.

CENSO DEPARTAMENTAL FIQUERO DEL CAUCA. (1997)

CEPIS OPS – OMS. Evaluación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento 2000 en las Américas, Informe Analítico para Colombia, Cap. 4, Situación Actual de la Prestación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento, Sección 4.2.3, Calidad del Agua en Cabeceras Municipales Documento de Internet en la siguiente dirección: <http://www.cepis.ops-oms.org/>. 2000.

CLEASBY, J. L.; HILMOE, D. J. AND DIMITRACOPOULUS, C.J. Slow Sand and Direct In-Line Filtration in surface Water. *Journal AWWA*. 76(12):44.USA. 1984.

COLLINS, M.R.; EIGHMY, T.T. AND MALLEY, J. P. Evaluation Modifications to Slow Sand Filters. In *Journal of the American Water works Association*. Vol. 83 No 9. USA. 1991. p 62-70.

COLLINS ET AL. Removal of Natural Organic Material by Slow Sand Filtration. In: Slow Sand Filtration. An International Compilation of Recent Scientific and Operational Development. De by Collins, M.R. And Graham, N.J.D. AWWA, USA. 1994

DAVIS, J.A. AND GLOOR, R. Adsorption of Dissolved Organics in Lake Water by Aluminum Oxide: Effect of Molecular Weight. *Envir. Sci. Technol.* 15:10:1223. 1981.

De HAAN, H. The Effect of Benzoate on Microbial Decomposition of Fulvic Acids in Tjeukemeer (the Netherlands). *Limnol. Oceanograph* 2:33-44. 1977

DI BERNARDO, L., AND ESCOBAR, A. Influence of Sand Uniformity Coefficient in Slow Sand Filtration Performance. In: *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. Edited by Nigel Graham and Robin Collins. John Wiley & Sons. London, United Kingdom. 1996.

ECOFIBRAS. Tintura de la fibra del Figue con Colorantes Naturales. Por la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB. Bucaramanga, Colombia. 2002.

EIGHMY, T. T. ET AL. Biologically Enhanced Slow Sand Filtration for Natural: Organic Matter Removal. AWWARF Final Report. 1992.

ELLIS, K. V. Slow Sand Filtration. C.R.C. Critical reviews in Environmental Control. Department of Civil Engineering, University of Technology.. United Kingdom. 1985. Vol 15. p 315 – 328.

FERNANDEZ, J.; MUÑOZ, N. Y LATORRE, J. Uso del Figue en la Potabilización del Agua. En: 5to Congreso Internacional de Fibras Naturales. Popayán, Colombia. 2000. p 57-57.

FOX, K.R.; GRAHAM, N.J.D. AND COLLINS, M.R. Slow Sand Filtration Today: An Introduction Review. In: *Slow Sand Filtration. An International Compilation of Recent Scientific and Operational Development*. De. By. Collins, M.R. and Graham, N.J.D. AWWA, USA. 1994.

GALVIS, G.; LATORRE, J.; OCHOA, A.E. AND VISSCHER, J.T. Comparison of Horizontal and Upflow Roughing Filtration. En Conferencia Internacional Sobre Mejoramiento de la Calidad del Agua. Cali, Colombia. 1996.

GALVIS G, LATORRE J. Y VISSCHER J.T. Filtración en Múltiples Etapas. Tecnología Innovativa para el tratamiento de Agua. Universidad del Valle, Cinara, IRC, Santiago De Cali, Colombia. 1999.

HAARHOFF, J. AND CLEASBY J.L. Biological and Physical Mechanisms in Slow Sand Filtration. Chapter 2. In: Task Committees on Slow Sand Filtration. Slow Sand Filtration. New York. 1991.

HUCK, P. M. Reduction in organic Levels and Disinfection Demand by Slow Sand Filtration in Western Europe. Department of Civil Engineering University of Alberta. Alberta, Canada. 1987.

-----, Use of Biological Processes in Drinking Water Treatment: Review of European Technology. Vol. 2. Site Visit Reports. Montreal, Canada. 1988.

HUISMAN, L., WOOD, W. E. "Slow Sand Filtration". World Health Organization (WHO). Geneva. 1974.

HUBREC, ET AL. Gedrag Van enhele gesubstitueerde benzene, bestrijdingsmiddelen en complexvormerstijdens langzame zandfiltratie. In Aqua vol 24, No 13. 1991. p 348-351.

LATORRE, J. Performance evaluation of dynamic roughing filtration. Msc Thesis Report, IHE Delft, The Netherlands. 1994.

LATORRE, J; GALVIS, G, AND VISSCHER, J.T.. Performance evaluation of dynamic roughing filtration. En Conferencia Internacional sobre Mejoramiento de la Calidad del Agua. Cali, Colombia. 1996.

LLOYD, B. AND HELMER, R. Vigilancia y Control de la Calidad de Agua para Consumo Humano en la zona Rural. Publicado para la WHO y UNEP por Logman scientific and technical. 1991.

MEYER, J. L. ET AL. Bacterial Growth on Dissolved Organic Carbon from a Blackwater River. *Microb. Ecol.* 13:13. 1987.

Ministerio de Desarrollo Económico. Inventario Nacional del Sector del Agua Potable y Saneamiento Básico, Santa fe de Bogotá. 1998.

-----, Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico – RAS. Santa fe de Bogotá. 2000.

-----, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Retos y Resultados, Bogotá, D.C. 2002.

Ministerio de Salud. Normas Técnicas de Calidad de Agua Potable. En: Decreto 475/1998. Santa Fe de Bogotá. 1998.

MONDRAGÓN, L. A. Políticas Nacionales Relacionadas con el Mejoramiento de la Calidad del Agua. En: Conferencia Internacional Sobre Mejoramiento de la Calidad del Agua, Cali. 1996.

OMS. Guías de Calidad de Agua para Consumo Humano. Recomendaciones. Vol. 1. Ginebra. 1993.

RACHWAL, A. J.A.; BAUER, M. J. AND WEST, J.T. Advanced Techniques for Upgrading Large Scale Slow Sand Filters, In: Slow Sand Filtration: Recent Developments in Water Treatment Technology. Edited by Grahan, N.J.D. London. United Kingdom. 1988.

RITTMANN, E.B. Y McCARTY, P.L. Biotecnología del Medio Ambiente. Principios y Aplicaciones. Editorial Mc GRAW-HILL INTERAMERICANA de España, S.A.U. 2001. p 25.

ROJAS, Roberto. Tratamiento de Efluentes de Curtiembre y Tecnología Limpia. En: XI Encuentro Nacional de la Industria del Cuero.. Rionegro Antioquia, Colombia. 2004. p 64.

SANCHEZ, L. D.; LATORRE, J. Y GALVIS, G. Comportamiento de la Población de algas y Protozoos después de la Limpieza de la Biomembrana en un Filtro Lento en Arena. En 20 Congreso Brasileiro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 1999.

SCHNEIDER, J. K. ET AL. Analytical Fractionation of dissolved Organic Matter in water Using on-line Carbon detection. Water research. . 18:12:1515-1522. 1984.

SOLO, Tova Maria. Independent Water Entrepreneurs in Latin America - The Other Private Sector in Water Services. Banco Mundial. Documento de Internet en la siguiente dirección:
<http://Inweb18.worldbank.org/lac/lac.nsf/0/2DCACD721793299785256DAA0071E435?Opendocument>. 2003.

SOLSANO, F. Y MENDEZ, J.P. Filtración Lenta en Arena. En: Desinfección del Agua. Cepis, 2000. p 49-57.

SONTHEIMER ET AL. Citado por: EIGHMY, T. T. ET AL. Microbial Activity in Slow Sand Filtration. In: Slow Sand Filtration. An International Compilation of Recent Scientific and Operational Development. De by Collins, M.R. And Graham, N.J.D. AWWA, USA. 1996. 218-238 p.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20 ed. APHA/AWWA/WPCF, 1998.

THURMAN, E. M. Organic Geochemistry of Natural Waters. Martinus NiJhoff/Dr. Junk Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 1985.

VISSCHER, J. T.; PARAMASIVAN, R.; RAMAN, A, AND HEIJNEM, H.A. Slow Sand Filtration for Community Water Supply. Planning, Design, Construction, Operation and Maintenance. Technical paper No 24. IRC. 149 pp. The Hague. The Netherlands. 1987.

WELTE, B. AND MONTIEL, A. Removal of BDOC by Slow Sand Filtration: Comparison with Granular Activated Carbon and Effect of Temperature. In Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration. Edited by Nigel Graham and Robin Collins. John Wiley & Sons. London, United Kingdom. 1996. p 95 – 99.

ANEXOS

ANEXO A

Aforo del vertedero del Filtro Lento en Arena en la línea de estudio.

Método volumétrico

Para el aforo del vertedero triangular que posee a la entrada el filtro lento en arena (de la línea de estudio para el proyecto estudio de la remoción de materia orgánica en sistemas de tratamiento con filtración en múltiples etapas en un ambiente tropical) se realizó mediante el método volumétrico.

Materiales utilizados

- Balde de 10 litros graduado
- Cronometro.
- reglilla

Procedimiento

Se mide una altura H en la cresta del vertedero, antes se deja estabilizar el caudal. Se introduce el balde sobre la salida del agua procedente del vertedero triangular y al mismo tiempo se dispara el cronometro para tomar el tiempo. Después de haber transcurrido un tiempo se retira el balde y se detiene el cronometro.

Se deja estabilizar el agua dentro del balde, se mide el agua que contiene y se registra el valor en litros, además se registra el tiempo. Este procedimiento se realiza de 5 a 10 veces, o las que sea necesario para obtener un dato confiable. Para obtener la ecuación de patronamiento se mide diferentes alturas H (mínimo 6), y se realiza el procedimiento anterior para cada altura.

Dimensiones del vertedero triangular.

Ángulo = 30 grados

Altura total 30 cm

Ancho superior de la abertura 13.5 cm`

Ancho total del vertedero 30 cm`
 Altura del vértice al borde superior 25cm
Cálculo de la ecuación de patronamiento

Método 1

Cálculo de Cd y K

Para realizar dichos cálculos se utilizan los datos obtenidos de caudal (el cual fue obtenido aplicando $Q=V/t$,) y carga hidráulica o altura del agua en la cresta del vertedero (triangular) (H). Se aplica la fórmula para vertedero triangular, el cual tiene un ángulo de 30°:

$$Q = 8/15 * Cd * \sqrt{2g} * (\tan (\beta/2)) * H^{5/2}$$

Despejando Cd:

$$Cd = \frac{15 * Q}{8 * \sqrt{2g} * (\tan (\beta/2)) * H^{5/2}}$$

Aplicando dicho despeje los primeros datos tenemos: (Q=2240cm³/s y H=12cm)

$$Cd = \frac{15 * 2240\text{cm}^3/\text{s}}{8 * \sqrt{2(980\text{cm}/\text{s}^2)} * (\tan (30/2)) * 12^{5/2}} = 0.7097$$

En la tabla A1 se registran los datos para encontrar la ecuación de patronamiento

Tabla A1 Alturas, caudales y coeficientes del vertedero.

H(cm)	Q(cm ³ /s)	Cdi	Cd	K
9,4	1390	0,81099	0,76451	4,83684
9,8	1544	0,81171		
10,8	1845	0,76078		
11	1850	0,72864		
11,2	2078	0,78239		
12	2240	0,70977		
12,4	2545	0,74294		
12,7	2796	0,76886		

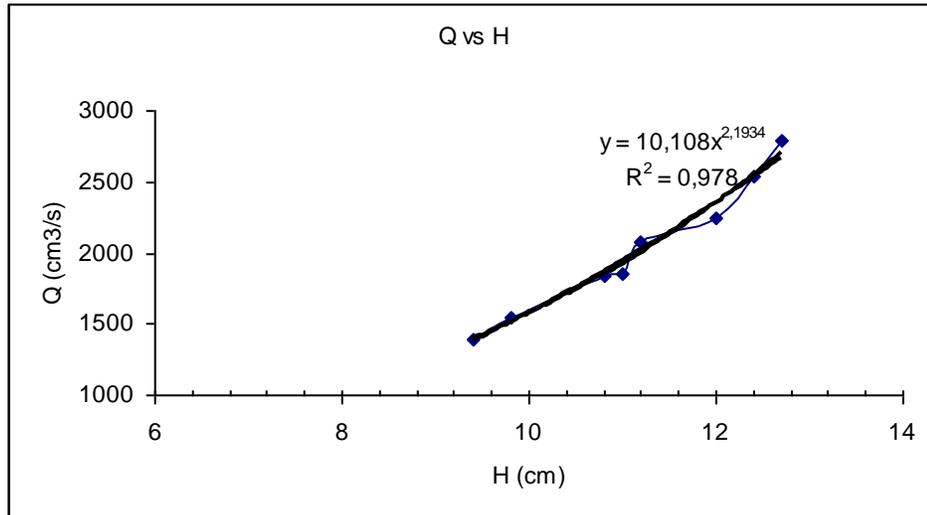
ECUACIÓN PATRONAMIENTO $Q = 4.83684 * H^{5/2}$

Método 2

Ajuste por mínimos cuadrados

Los datos de caudal y altura sobre el vertedor se ajustan a una ecuación de mínimos cuadrados, como la que se presenta en la figura 1, la cual presenta un coeficiente correlación igual a 0.978, considerado como un buen ajuste.

Figura A1. Ajuste por mínimos cuadrados.



Comparación de los dos métodos

En la tabla dos se pueden apreciar los caudales estimados por los dos métodos, en comparación con los obtenidos en campo. El método de Mínimos cuadrados genera un mayor precisión por lo cual se recomienda usar este método, para establecer la regilla de aforo (ver tabla A.3)

Tabla A.2 Comparación de los métodos de calibración.

Altura sobre vertedero (cm)	Caudal Datos de Campo (L/s)	Ajuste con coeficiente de descarga (L/S)	Ajuste por mínimos cuadrados (L/s)
9,4	1,39	1,31	1,38
9,8	1,54	1,45	1,51
10,8	1,85	1,85	1,87
11	1,85	1,94	1,94
11,2	2,08	2,03	2,02
12	2,24	2,41	2,35
12,4	2,55	2,62	2,53
12,7	2,80	2,78	2,67

Tabla A.3 Reglilla de aforo

Altura (cm)	Caudal (L/s)
1	0,01
1,5	0,02
2	0,05
2,5	0,08
3	0,11
3,5	0,16
4	0,21
4,5	0,27
5	0,34
5,5	0,43
6	0,51
6,5	0,61
7	0,72
7,5	0,84
8	0,97
8,5	1,10
9	1,25
9,5	1,41
10	1,58
10,5	1,76
11	1,94
11,5	2,14
12	2,35
12,5	2,57
13	2,81
13,5	3,05
14	3,30
14,5	3,56
15	3,84

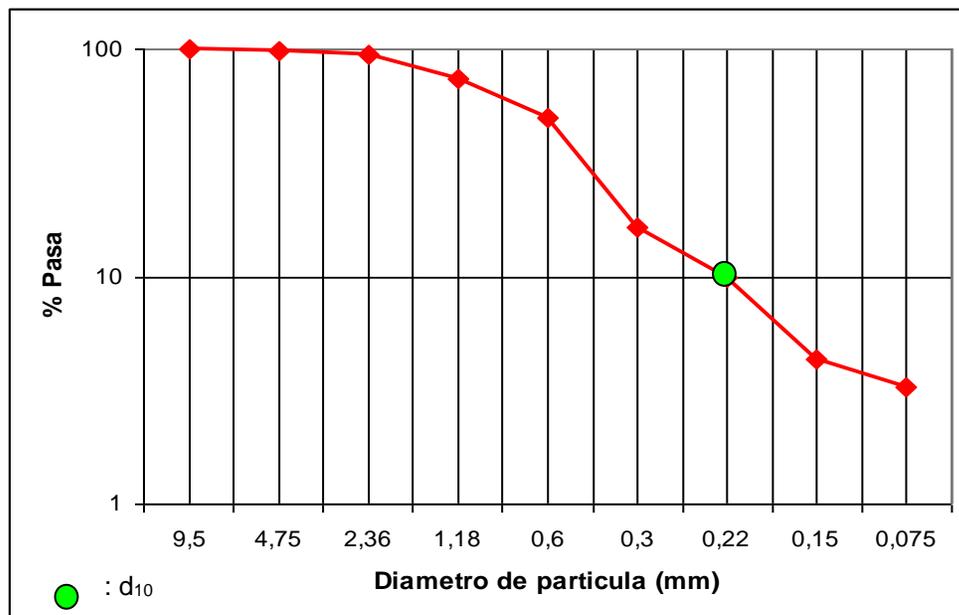
ANEXO B

Datos para el análisis granulométrico del lecho filtrante del Filtro Lento en Arena.

Tabla B.1 Valores obtenidos del análisis granulométrico.

TAMICES	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8	0	0	0	100
4	7,83	1,09	1,09	98,91
8	37,66	5,25	6,34	93,66
16	139,44	19,44	25,78	74,22
30	172,75	24,08	49,86	50,14
50	241,80	33,71	83,57	16,43
100	86,60	12,07	95,64	4,36
200	7,89	1,10	96,74	3,26
P - 200	23,35	3,26	100	0

Figura B.1 Curva Granulométrica del Filtro Lento en Arena.



ANEXO C

Comportamiento del pH

Tabla C1 Datos de pH.

Día de Operación	Muestra No	Ent. Agua Cruda	SALIDA F.G.Di	SALIDA F.G.A.C	INTEGRADO F.G.A.C	SALIDA F.L.A
0	1	7,11	7,1	7,18	7,13	7
4	2	7,23	7,23	7,29	7,2	6,85
6	3	7,36	7,32	7,18	7,04	7,12
11	4	7,04	7	7	7	7,03
12	5	7,13	7,13	7,15	7,11	7,2
19	6	6,64	6,61	6,58	6,57	6,6
21	7	6,95	6,86	6,76	6,62	6,82
24	8	6,6	6,53	6,49	6,43	6,45
26	9	7,31	7,29	7,24	7,24	7,18
31	10	7,25	7,23	7,21	7,22	7,29
33	11	7,15	7,1	7,15	7,17	7,08
38	12	7,21	7,11	7,09	6,97	6,95
40	13	7,26	7,21	7,08	7,11	7,3
47	14	7,57	7,48	7,42	7,42	7,32
50	15	7,08	7,07	7,05	6,99	6,75
52	16	6,6	6,6	6,54	6,55	6,48
54	17	6,63	6,62	6,6	6,6	6,5

ANEXO D

Comportamiento de la Turbiedad

Tabla D.1 Datos de Turbiedad para la carrera de filtración.

Día de Operación	Entrada de Agua Cruda	Salida de F.G.Di	Salida de F.G.A.C	Integrado F.G.A.C	Salida F.L.A
0	26	25	14	9	4
4	13	8	2	2	2
6	18	12	4	3	0
11	26	18	5	5	0
12	6	5	2	1	0
19	10	7	0	1	0
21	24	21	4	3	0
24	14	12	7	5	2
26	4	4	1	1	0
31	14	12	5	4	1
33	12	7	5	4	1
38	6	4	1	0	0
40	5	4	2	2	1
47	31	14	6	5	1
50	49	29	15	17	0
52	15	10	5	5	1
54	157	122	79	73	1

ANEXO E

Comportamiento del Color real

Tabla E.1 Datos de Color real para la carrera de filtración.

Día de Operación	Entrada de Agua Cruda	Salida F.G.Di	Salida F.G.A.C	Integrado .F.G.A.C	Salida F.L.A
0	22	19	2	3	4
4	12	10	8	6	2
6	16	13	9	9	5
11	24	22	15	15	5
12	18	17	11	11	5
19	22	18	12	11	4
21	145	137	15	4	4
24	5	3	0	0	0
26	17	14	11	11	5
31	27	24	19	18	8
33	18	17	12	12	6
38	39	37	33	32	29
40	40	23	17	15	4
47	17	15	10	11	6
50	47	44	28	26	11
52	14	10	8	8	6
54	112	110	105	61	18

ANEXO F

Comportamiento de la Absorbancia UV 254 nm

Tabla F.1 Datos de Absorbancia UV 254 nanómetros.

Día de Operación	Entrada de Agua Cruda	Salida F.G.Di	Salida F.G.A.C	Integrado F.G.A.C	Salida F.L.A
0	0,094	0,073	0,079	0,145	0,042
4	0,047	0,045	0,066	0,033	0,029
6	0,07	0,07	0,063	0,06	0,036
11	0,095	0,094	0,075	0,075	0,057
12	0,081	0,074	0,059	0,058	0,039
19	0,073	0,074	0,06	0,056	0,034
21	0,074	0,063	0,064	0,066	0,035
24	0,074	0,071	0,057	0,059	0,038
26	0,08	0,077	0,065	0,064	0,046
31	0,107	0,09	0,069	0,081	0,07
33	0,08	0,084	0,068	0,073	0,047
38	0,091	0,085	0,07	0,067	0,048
40	0,106	0,091	0,07	0,075	0,054
47	0,1	0,094	0,08	0,08	0,042
50	0,119	0,111	0,094	0,093	0,062
52	0,086	0,085	0,076	0,075	0,052
54	0,218	0,231	0,198	0,216	0,088

ANEXO G

Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno

Tabla G.1 Datos de la Demanda Química de Oxígeno.

Día de Operación	Ent. Agua Cruda	Día de Operación	Salida F.G.Di	Día de Operación	Salida F.G.A.C	Día de Operación	Integrado F.G.A.C	Día de Operación	Salida F.L.A
0	6,72	0	1,16	0	2,58	0	4,49	0	2,9
4	36	6	3,54	4	2,58	4	5,12	6	1,2
6	1,8	11	5,92	6	0,52	6	3,7	11	1,47
11	4,81	12	5	11	1,31	11	6,71	12	1,4
12	4,75	19	1,31	12	1,25	12	6	19	1,63
19	3,54	21	12,43	19	1,95	19	4,49	31	1,31
21	21	24	5,76	24	2,26	24	1,31	33	1,31
24	2,26	31	4,49	31	1,95	31	1,31	47	2,74
31	8,14	33	4,81	33	2,58	33	1,47	50	4,81
33	9,1	40	6,08	40	2,9	40	3,53	52	3,22
40	5,12	47	5,76	47	2,26	47	2,58	54	2,27
47	7,98	50	7,34	50	7,51	50	6,55		
50	10,68	52	5,13	52	3,06	52	3,86		
52	4,18	54	16,08	54	8,62	54	8,46		
54	16,56								

ANEXO H

Comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Tabla H.1 Datos de Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Día de Operación	Ent. Agua Cruda	Día de Operación	Salida F.G.Di	Día de Operación	Salida F.G.A.C	Día de Operación	Integrado GAC	Día de Operación	Salida F.L.A
0	5,16	0	7,02	0	2,34	0	1,74	0	1,26
4	6,42	4	4,14	4	1,8	6	0,6	4	1,07
11	6,96	6	1,32	6	0,12	11	2,28	6	0,1
12	0,54	11	4,08	11	3,48	12	0,12	11	0,48
19	3,42	19	0,6	12	0,6	19	2,28	12	0,1
24	1,68	24	0,6	19	0,54	24	0,6	19	0,1
31	5,5	31	1,8	21	0,48	26	0,6	24	0,19
33	1,2	33	0,6	26	1,14	31	5,4	31	0,1
38	1,5	38	0,55	31	0,66	33	1,2	33	0,2
47	0,5	47	3,65	38	0,5	38	1	38	0,1
52	0,85	52	1,15	47	1,6	47	0,7	47	0,39
				52	1	52	2,7		

ANEXO I

Comportamiento de coliformes fecales

Tabla I.1 Datos de análisis Microbiológicos (Coliformes Fecales. UFC/100mL).

Día de Operación	Entrada de Agua Cruda	Salida F.G.Di	Salida F.G.A.C	Integrado F.G.A.C	Salida F.L.A
1	2350	525	352	281	11
4	1000	1375	332	332	4
6	1400	1190	395	432	0,1
11	2100	1345	169	197	1
12	2250	2140	235	198	2
19	2500	2000	298	235	0,1
21	12850	5800	876	805	0,1
24	3850	1690	260	240	2
26	4000	2660	351	468	1
31	6800	4600	387	1500	2
33	5100	2025	210	1440	3
38	1000	1770	2144	207	0,1
40	5850	1545	173	422	1
47	3350	2900	470	353	2
50	5500	1040	400	464	0,1
52	2100	1800	420	472	1
54	550	55	6	6	1

ANEXO J

Comportamiento de caudal y tasa de filtración de las unidades de FGAC y FLA

Tabla J.1 Caudal y Tasa de Filtración de FGAC y FLA.

Caudal F.G.A.C (m ³ /h)	Tasa de filtración	Caudal entrada a F.L.A (m ³ /h)	Tasa de filtración (m ³ /m ² *h)
7,2	0,30	7,2	0,16
4,32	0,18	5,76	0,13
12,6	0,53	11,88	0,26
5,76	0,24	9	0,20
7,2	0,30	11,52	0,26
14,04	0,59	8,28	0,18
7,2	0,30	10,44	0,23
7,92	0,33	8,28	0,18
7,92	0,33	12,24	0,27
7,56	0,32	7,2	0,16
7,2	0,30	8,28	0,18
7,2	0,30	7,92	0,18
7,2	0,30	7,2	0,16
7,2	0,30	7,2	0,16
7,56	0,32	8,28	0,18
7,2	0,30	8,64	0,19
7,2	0,30	9,72	0,22

ANEXO K

Pérdidas de carga (linealizada), de la unidad De Filtro Grueso en Capas

Tabla K.1 Pérdidas de Carga para el Filtro Grueso Ascendente en Capas, (Linealizada).

Días de Operación	Pérdida de Carga (Linealizadas) (cm)
1	2,60
6	6,51
11	8,25
12	7,00
21	8,20
24	8,18
26	8,73
31	6,29
33	17,6
38	7,8
40	4,4
47	2,5
50	3,2
52	3,2
54	2,5

ANEXO L

Pérdidas de carga (linealizada), de la unidad De Filtro Lento en Arena

Tabla L.1 Pérdidas de carga para el Filtro Lento en Arena. (Linealizada).

Días de Operación	Pérdida de Carga. (linealizadas) (cm)
1	7,3
4	8
6	9,70
11	9,6
21	12,21
24	12,26
26	14
33	18,09
38	19,36
40	23,90
47	29,50
50	35,04
52	36,33
54	43,93