

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL
FILTRO MÚLTIPLE GRANULAR CON GEOMEMBRANA
PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA
(FILTRO PILOTO)**

**JANETH MIREYA CÓRDOBA JURADO
PABLO ANDRÉS SALAZAR ALEGRÍA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2004**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL
FILTRO MÚLTIPLE GRANULAR CON GEOMEMBRANA
PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA
(FILTRO PILOTO)**

**JANETH MIREYA CÓRDOBA JURADO
PABLO ANDRÉS SALAZAR ALEGRÍA**

**Trabajo de grado presentado para
optar el título de Ingeniero Civil**

**Director
ROBERTO EFRAÍN SALAZAR CANO
Ingeniero Civil
Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2004**

Las ideas y conclusiones aportadas en un trabajo de grado son responsabilidades exclusivas del autor.

Artículo 1 del acuerdo 234 del 11 de octubre de 1996, emanado del honorable concejo directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Director Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, 19 de febrero de 2004

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Roberto Salazar Cano, ingeniero civil, director del Trabajo de Grado, por su orientación en la realización de la investigación.

Luis Jesús Imbaquín, por permitir la instalación del filtro experimental piloto en su propiedad y por su colaboración con el suministro de agua.

María Elena Solarte, directora de laboratorios de la Universidad de Nariño, por permitirnos contar con los servicios de los laboratorios de Hidráulica y Química.

Centro Inter-regional de Abastecimiento y Remoción de Agua – CINARA, por su información acerca de los procesos de filtración múltiple por etapas (FiME).

Doris Martínez, ingeniera civil, secretaria académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, por su dedicación en la revisión del anteproyecto e informe final del presente Trabajo de Grado.

Gabriel Jurado Delgado, ingeniero civil, por su tiempo dedicado en la revisión del informe final del presente Trabajo de Grado.

Roberto García y personal de laboratorios de la Universidad de Nariño, por su colaboración en la realización de los análisis físico-químicos y bacteriológicos del agua.

Todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de la presente investigación.

*El éxito de este importante logro se lo dedico a Dios, quien me fortaleció en mis momentos
de dificultad para no perder el horizonte,
A mi Madre por su apoyo incondicional y comprensión,
A mis hermanos Sonia, Carlos y Javier, quienes se convirtieron en un importante soporte a
lo largo de mi carrera,
A Javier, mi esposo adorado, mi amor infinito, por creer en mí y por estar siempre a mi
lado.
Y en especial a Carlos Javier, mi hijo querido, la luz de mi vida, por ser mi motivo y mi
fuerza para seguir siempre adelante.*

Janeth

El presente Trabajo de Grado se lo dedico a mis padres: Nubia y Servio Tulio. A mis hermanos: Oscar Fernando y Diego Mauricio. A mi novia N. JOHANA y compañeros.

Pablo Andrés

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. ANTECEDENTES	23
1.1 GENERALIDADES	23
1.2 EXPERIENCIAS EN UN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DEL INSTITUTO CINARA	27
1.2.1 Descripción del proyecto	27
1.2.2 Presentación y discusión de resultados.	29
1.2.2.1 Calidad de agua cruda y pretratada	29
1.2.2.2 Calidad de efluente y eficiencia de los FLA	29
1.2.2.2.1 Unidades convencionales de FLA	29
1.2.2.2.2 Proyecto de investigación CINARA	29
1.3 UNIDADES EN UN PROCESO DE FILTRACIÓN MÚLTIPLE GRANULAR	33
1.3.1 Filtro Grueso Dinámico (FGDi)	33
1.3.2 Filtro Grueso	34
1.3.3 Geomembranas	35
1.4 PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	37
1.4.1 Turbiedad	37

1.4.2	Color real	38
1.4.3	Sólidos suspendidos	38
1.4.4	Coliformes fecales	39
1.5	NORMAS VIGENTES	40
1.5.1	Decreto 475 de 1.998 (capítulo III)	40
1.5.1.1	Normas de calidad organolépticas, físicas y químicas	40
1.5.1.2	Normas microbiológicas	40
1.5.2	Norma RAS – 2.000 (capítulo C.3)	41
1.5.2.1	Generalidades	41
1.5.2.2	Velocidad de filtración	42
1.5.2.3	Velocidad de lavado	42
1.5.2.4	Altura del agua sobrenadante	42
1.5.2.5	Composición del medio filtrante	42
1.5.2.6	Espesor del medio filtrante	43
1.5.2.7	Calidad del agua tratada	43
2.	DISEÑO METODOLÓGICO	44
2.1	HIPÓTESIS DEL PROYECTO	44
2.2	INFORMACIÓN PRELIMINAR	44
2.2.1	Revisión bibliográfica	44
2.2.2	Referencias adquiridas de otras fuentes	45

2.3	INSPECCIÓN - RECONOCIMIENTO DEL SITIO DE TRABAJO	46
2.4	DISEÑO DEL FILTRO PILOTO	46
2.4.1	Captación de la fuente y conducción al sistema	47
2.4.2	Diseño del filtro grueso dinámico (FGDi)	48
2.4.3	Diseño del filtro grueso de flujo ascendente (FGAs)	50
2.4.4	Diseño de múltiples (según Hudson)	52
2.4.4.1	Recolectores múltiples en el FGDi	52
2.4.4.2	Difusor y recolector múltiple en el FGAs	54
2.4.5	Determinación de pérdidas de energía en los múltiples	56
2.4.5.1	En el múltiple recolector del FGDi	56
2.4.5.2	En el múltiple difusor del FGAs	59
2.4.6	Pérdida de energía en los lechos filtrantes	63
2.4.6.1	Para el filtro grueso dinámico (FGDi)	63
2.4.6.2	Para el filtro grueso de flujo ascendente (por capas) (FGAs)	64
2.4.7	Pérdida de energía en el geotextil (NT – 2.000)	65
3.	PLANTA EXPERIMENTAL PILOTO	66
3.1	LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	66
3.2	FUENTE DE ABASTECIMIENTO	66
3.3	CAPTACIÓN DE LA FUENTE Y CONDUCCIÓN AL SISTEMA	66
3.4	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL	67
3.5	ETAPAS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL FILTRO PILOTO	67
3.5.1	Estructura en acrílico	67
3.5.2	Tuberías, mangueras, accesorios y múltiples difusores – recolectores	67

3.5.3	Obtención, tamizado y lavado de la piedra de río	69
3.5.4	Puesta en marcha del sistema	70
3.6	TOMA DE MUESTRAS	71
3.6.1	Programación	71
3.6.2	Puntos de muestreo	72
3.6.3	Características físicas del agua	72
3.6.4	Características microbiológicas del agua	72
3.7	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	72
3.7.1	Operación del filtro piloto	73
3.7.2	Mantenimiento del filtro piloto	74
4.	OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA	75
4.2	CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA	75
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	91
4.3.1	Turbiedad	91
4.3.2	Color (aparente y verdadero)	92
4.3.3	Sólidos suspendidos	93
4.3.4	Coliformes (fecales y totales)	94
5.	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES	98
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXO	102

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Eficiencias típicas de tratamiento de unidades convencionales de filtración lenta en arena	30
Cuadro 2. Eficiencias de remoción parciales y acumuladas (proyecto Cinara)	31
Cuadro 3. Eficiencias de remoción encontradas en fuentes superficiales tratadas por filtros gruesos dinámicos (FGDi)	33
Cuadro 4. Eficiencias típicas de tratamiento por filtros gruesos ascendentes (FGAs)	35
Cuadro 5. Valores admisibles desde el punto de vista microbiológico	41
Cuadro 6. Velocidad de filtración para cada tipo de filtro	42
Cuadro 7. Profundidad o longitud del medio filtrante	43
Cuadro 8. Disposición de los lechos filtrantes en el FGDi	50
Cuadro 9. Lecho filtrante recomendado en el FGAs	52
Cuadro 10. Criterios de diseño de múltiples difusores y recolectores	53
Cuadro 11. Especificaciones de tamizado para la grava del FGDi	69
Cuadro 12. Especificaciones de tamizado para la grava del FGAs	69
Cuadro 13. Programación para la toma de muestras	72
Cuadro 14. Valores de turbiedad y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema	76
Cuadro 15. Valores de color aparente y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema	79
Cuadro 16. Valores de color verdadero y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema	82
Cuadro 17. Valores de sólidos suspendidos y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema	85
Cuadro 18. Valores de coliformes fecales y porcentajes de remoción	88
Cuadro 19. Valores de coliformes totales y porcentajes de remoción	88

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Promedios de turbiedad, color y coliformes fecales afluente y efluente de los filtros lentos evaluados. Período I. (Proyecto Cinara)	31
Figura 2. Filtro piloto (estructura en acrílico, andamio y tubería)	68
Figura 3. Estratos filtrantes de grava en el FGD _i	70
Figura 4. Estratos filtrantes de grava en el FGAs	70
Figura 5. Disposición del geotextil NT – 2.000 en el FGAs	71
Figura 6. Filtro piloto en funcionamiento	74
Figura 7. Variación de turbiedad por etapa del sistema	78
Figura 8. Variación de color aparente por etapa del sistema	81
Figura 9. Variación de color verdadero por etapa del sistema	84
Figura 10. Variación de sólidos suspendidos por etapa del sistema	87
Figura 11. Variación de coliformes fecales	89
Figura 12. Variación de coliformes totales	90

GLOSARIO

ADSORCIÓN: retención en la superficie de un cuerpo, moléculas o iones de otro cuerpo.

AFLUENTE: caudal de agua que desemboca o descarga en otro principal.

AGUAS TRATADAS: efluente resultante en un sistema de tratamiento.

BIOMASA: conjunto de bacterias, protozoarios, algas y larvas que oxidan la materia orgánica y que contribuyen a la remoción de microorganismos.

CAPTACIÓN: componente destinado para captar o extraer una determinada cantidad de agua de una fuente.

CARGA SUPERFICIAL: es la relación entre caudal y área superficial.

CAUDAL DE DISEÑO: es el caudal estimado (calculado), para el cual se diseñan las diferentes estructuras para un sistema de acueducto.

COAGULANTE: sustancia que permite la precipitación de una masa sólida o coágulo.

COLIFORME: relativo a los bacilos entéricos fermentativos gramnegativos, algunas veces se restringen a aquellos que fermentan la lactosa.

COLOR VERDADERO: medida indirecta de ácidos fúlvicos y húmicos, los que en muchas circunstancias se constituyen en el material orgánico más abundante en aguas superficiales.

CONDUCCIÓN: sistema empleado para guiar o conducir el agua.

CONTAMINACIÓN: alteración nociva de la pureza o condiciones normales de un medio por agentes químicos o físicos.

DESARENADOR: componente destinado para la remoción de arena que se encuentra en suspensión en el agua, mediante el proceso de sedimentación.

DESINFECTAR: destruir o evitar el desarrollo de los gérmenes nocivos que pueden ser causa de infección.

EFLUENTE: caudal de agua que fluye o escapa al exterior.

FILTRACIÓN GRUESA: tecnología de prefiltración de uso apropiado para sistemas de tratamiento de aguas.

FILTRACIÓN MÚLTIPLE POR ETAPAS (FiME): mejoramiento de la calidad del agua mediante la utilización de más de una etapa de tratamiento. Combinación de filtro lento en arena y filtros en grava.

FILTRACIÓN: paso a través de un filtro o de un material que impide el paso de ciertas partículas.

FILTRO GRUESO DINÁMICO (FGDi): sistema empleado como primera etapa de pretratamiento, en el que se incluye una capa delgada de grava fina en la parte superior y otra más gruesa en contacto con el sistema de drenaje de fondo. El agua que entra en la unidad pasa sobre la grava y parte de ella es captada a través del lecho y pasa hacia la próxima capa de tratamiento.

FILTRO GRUESO: sistema que opera, bien sea, como filtro de flujo vertical u horizontal. Consta de un compartimiento principal, donde se ubica un lecho filtrante de grava, el cual disminuye de tamaño con la dirección del flujo; un sistema de drenaje ubicado en el fondo de la estructura, sirve para distribuir el flujo durante la carrera de filtración o para drenar los lechos de grava durante las actividades de limpieza.

FILTRO: aparato a través del cual se hace pasar un fluido, para limpiarlo de las materias que contiene en suspensión, o para separarlo de las materias con que está mezclado.

GOLPE DE ARIETE: mecanismo hidráulico que se produce cuando el flujo es detenido rápidamente, por ejemplo, al cerrar una válvula, o por el paso cuando deja de funcionar una bomba (válvula cheque) en una conducción.

GRAVA: materiales sueltos en los que dominan los guijarros.

GUIJARRO: piedra pequeña desgastada por la erosión.

LAVADO SUPERFICIAL: mecanismo de lavado mediante el cual se remueven los sólidos retenidos en la superficie.

MICROORGANISMO: organismo microscópico, vegetal o animal, por ejemplo las bacterias.

PERMEABILIDAD: propiedad de las membranas para permitir el paso de ciertas sustancias.

POTABILIZACIÓN: proceso mediante el cual se obtiene un líquido apto para el consumo.

PRETRATAMIENTO: fase de tratamiento sencilla, eficiente y libre de químicos, aplicada predominantemente para la remoción de sólidos. Proceso que mejora significativamente la calidad microbiológica del agua.

SANEAMIENTO: acción y efecto de sanear. Dar condiciones de salubridad.

SEDIMENTACIÓN: acción de la materia que habiendo entrado suspendida en un líquido, se posa en el fondo por su mayor peso.

TURBIEDAD: conjunto de partículas finas presentes en el agua.

RESUMEN

El Trabajo de Grado consiste en el desarrollo de la I etapa del estudio de la Filtración Múltiple Granular utilizando geomembranas, partiendo de experiencias del instituto Cinara con sistemas de Filtración Múltiple por Etapas (FiME), y especificaciones de la norma RAS-2.000 comprendiendo, inicialmente, el funcionamiento del sistema de filtración tradicional (FiME) como base fundamental que moldea la nueva alternativa de filtración aquí planteada.

Un sistema FiME es la integración de tres unidades: Filtro Dinámico (FGDi), Filtro Grueso y Filtro Lento en Arena (FLA). Considerando costos, la última unidad corresponde al 37 a 55 % de la inversión inicial la cual, si se sustituye por una geomembrana, resultaría un nuevo sistema de filtración mucho más asequible, llamado “Múltiple Granular con Geomembrana”, que consta de las dos primeras unidades y el geotextil.

Las actividades preliminares fueron: selección de la fuente de abastecimiento del sistema, eligiendo la quebrada Mijitayo debido a sus picos de turbiedad, color y sólidos suspendidos durante episodios lluviosos, permitiendo una mejor observación de eficiencias del sistema; ubicación del filtro en un lugar seguro y apto para labores de mantenimiento; construcción de la estructura acrílica y andamio metálico, para lo cual fue necesario contar con los servicios de fábricas especializadas; consecución y tamizado de piedra del río Guáitara, entre otras actividades explicadas en el desarrollo del documento.

Al culminar la I etapa se deja el sistema en funcionamiento, dejando resultados correspondientes a la toma de muestras preliminar mostrando el comportamiento inicial del filtro piloto en cuanto a algunos parámetros de clasificación de la calidad del agua: turbiedad, color, sólidos suspendidos y coliformes.

Se formularon observaciones enfocadas a las siguientes etapas de investigación, reflejando logros y deficiencias durante la construcción, puesta en marcha, operación y mantenimiento del filtro piloto, es decir, dejando un aporte que permita perfeccionar, paulatinamente, dicho dispositivo.

SUMMARY

The thesis consists in first stage development of the Granulate Multiple Filtration study using geo-membranes, parting since Cinara institute experiences with Multiple Filtration by Stages (FiME) systems and RAS – 2000 Norm specifications understanding, initially, traditional filtration system functioning (FiME) as a fundamental basis for molding the new filtration alternative stated here.

A FiME system is three units integration: Dynamic Filter (FGDi), Granulate Filter and Slow Filter at Sand (FLA). If costs are considered, last unit corresponds since 37 until 55 % of the initial investment, which if it's replaced by a geo-membrane, a more affordable new filtration system would result, named "Granulate Multiple with geo-membrane", which contains the two first units and the geo-textile.

Preliminary activities were: system supply fountain selection, choosing Mijitayo gorge by its sharp points of turbidity, color and suspended solids during rainy episodes, which allows a better observation of system efficiency; filter location at safe and fit place for maintenance labors; acrylic structure and metallic scaffold construction, which depended on specialized factories services; Guaitara river stones procurement and sieved, among other activities explained in the document development.

Culminating the first stage, the system remains in functioning, leaving results which correspond to preliminary samples taking, showing pilot filter initial behavior for some water quality classification parameters: turbidity, color, suspended solids and coli-forms.

Observations were formulated for focusing them to next investigation stages, reflecting achievements and deficiencies during construction, impulse, operation and maintenance of pilot filter, that is, leaving a contribution which allows improving that device, gradually.

INTRODUCCIÓN

En países como Colombia, en donde gran parte de las necesidades más elementales de la población se encuentran insatisfechas, principalmente en zonas rurales debido, por lo general, a la escasez de recursos económicos, es necesario definir nuevas alternativas de solución que sean más económicas pero igual o aun más confiables que los procesos tradicionales de filtración, haciendo referencia al tratamiento para abastecimiento de agua potable y saneamiento.

De esta manera, enfocando la tecnología convencional de la Filtración Múltiple por Etapas (FiME) se propone buscar, investigar, desarrollar y aplicar una variación u otra alternativa a este sistema (nueva tecnología), consistente en la utilización de una geomembrana que permita suprimir el filtro lento para que, en lo posible, se constituya en una solución que sea viable, económica, eficiente y de fácil aplicación, operación y mantenimiento, tratando de obtener resultados de calidad del agua, por lo menos, similares que los de FiME y, de esta manera, garantizar las condiciones de las aguas tratadas con un nivel de economía acorde para nuestras poblaciones, logrando realizar un aporte a este macroproblema social.

Se espera que el estudio colme las expectativas y propósitos planteados, tanto desde el punto de vista de los requerimientos y exigencias de los entes vigilantes de la calidad del agua para suministro público, como de cualquier persona o grupo que esté interesado en continuar con las siguientes fases de este estudio, cuyo fin primordial es contribuir con el mejoramiento de la calidad del agua para abastecimiento de nuestras poblaciones a mejores niveles de economía y eficiencia.

El trabajo de investigación denominado: *“Diseño, construcción y puesta en marcha del filtro múltiple granular con geomembrana para potabilización del agua”* (filtro piloto), se esboza en el marco de cuatro capítulos.

En el primer capítulo se expone la naturaleza y alcances del estudio, además de los referentes de contexto y teóricos.

El segundo capítulo trata sobre los referentes técnicos y el diseño del sistema de filtración (filtro piloto).

En el tercer capítulo se explican las orientaciones metodológicas que se efectuaron para desarrollar la investigación.

En el cuarto capítulo se realiza el análisis e interpretación de la información obtenida en el proceso investigativo.

Para fortalecer el trabajo se elaboran conclusiones pertinentes a los resultados de la investigación y se hacen algunas recomendaciones para contribuir con el mejoramiento del filtro piloto en las siguientes fases de la investigación.

Los autores de este trabajo ponen a su disposición los resultados de esta investigación, como un instrumento que permite tener una visión clara del comportamiento inicial del filtro piloto y, de esta manera, concretar propuestas de mejoría para el sistema de filtración.

1. ANTECEDENTES

1.1 GENERALIDADES

A comienzos de la humanidad, el agua era consumida tal como se encontraba en la naturaleza. Podía ser pura y abundante, suficiente pero turbia, escasa pero cristalina, o escasa y mala. Para conseguir más o mejor agua el hombre se trasladaba cerca de otras fuentes en lugar de transportar el agua de mejor calidad a su propia localidad, o tratar de mejorar la calidad del agua que tenía disponible.

Los estándares de calidad del agua de los primeros hombres eran pocos: que estuviera libre de barro o lodo, así como de sabor y olor. Sin embargo, ahora la polución del agua causada por el hombre, el desarrollo de la técnica y de la ciencia de la salud pública junto a la necesidad de agua de buena calidad por parte de las comunidades contribuyen al desarrollo de la tecnología del tratamiento del agua.

En la segunda mitad del siglo XIX fue generalmente aceptado que la solución a los problemas de salud pública, dependía de una mejor infraestructura sanitaria que incluyera grandes proyectos de ingeniería. Hacia finales del siglo, la ciencia y la medicina empezaron a tener un papel creciente en esta creencia. Con el surgimiento de la bacteriología después de los descubrimientos de Pasteur y Koch en los años 1.880s, la teoría de los “gérmenes” (germ theory) cobró importancia en la lucha de enfermedades contagiosas (Coley, 1.989), enriqueciendo el interés por aspectos que incluían acciones de abastecimiento de agua, saneamiento básico y educación en higiene, entre ellas, la sedimentación simple y la filtración en medios porosos.

Si bien la sedimentación simple podía clarificar el agua, la filtración podía mejorar aun su apariencia. La filtración lenta en arena fue introducida por primera vez para servir una ciudad y una pequeña industria en Paisley, Escocia en 1.804 y el ingeniero James Simpson, de la Chelsea Water Company, la introdujo en 1.828 en Londres, después de realizar visitas de observación a sistemas de abastecimiento en diferentes localidades y de estudios a escala piloto realizados por él mismo. Solo después de la teoría de los gérmenes de los 1.880s, se encontró, que en el lecho de arena hay una biomasa que incluye bacterias, protozoarios, algas y larvas que oxidan la materia orgánica y que contribuyen a la remoción de los microorganismos.

El potencial de los filtros lentos fue bien valorado y aprovechado en Europa. Los norteamericanos recuperaron su experiencia a finales del siglo XIX pero la necesidad de procesar grandes dotaciones y la diversidad de calidades de agua en las fuentes estimuló el desarrollo de la filtración rápida en arena, la cual resolvió el problema del volumen creciente pero requería coagulantes para trabajar adecuadamente y no resultaba tan eficiente como la filtración lenta en la remoción de gérmenes.

Aunque la filtración rápida presentara remociones altas de microorganismos, éstas no eran completas ni permanentes y sus efluentes aun podían presentar algún riesgo de causar enfermedades. El cloro fue entonces reconocido por su potencial o para desinfectar y reducir estos riesgos y empezó a ser utilizado desde 1.904 en Estados Unidos, en sistemas de abastecimiento de aguas. La expansión continuada en el uso de la filtración rápida y la desinfección a lo largo del siglo XX ha contribuido sustancialmente a la reducción de enfermedades asociadas con el agua y a mejorar la productividad y la calidad de vida en todos aquellos asentamientos humanos que han tenido la posibilidad y la capacidad de adquirir y sostener estas tecnologías. Si bien son muchas las opciones tecnológicas de tratamiento de agua, la selección de la mejor, para una comunidad específica aun sigue siendo un desafío. Particularmente si ella es de bajos ingresos económicos y no cuenta con instituciones o formas organizativas mínimamente consolidadas. La superación de este reto requiere criterio y trabajo metódico, para decidir por una solución económica y sencilla de operar, mantener y administrar, procesando agua de fuentes que cada vez necesitan más y mejores acciones de conservación.

Colombia presenta serios problemas de calidad de agua para consumo humano, según ha sido reportado por el Ministerio de Salud*, únicamente el 62 % de la población tiene agua de buena calidad en las áreas urbanas y 10 % en las áreas rurales. La magnitud del problema es mayor al observar las cifras globales en cuanto a calidad del agua para consumo humano: solo un 45,9 % de la población (17'325.000 hab.) estaría siendo abastecido con agua de calidad aceptable, entendiéndose por “calidad aceptable” el agua que además de circular por una estructura de acueducto tienen un sistema continuo de tratamiento, distribuyendo el agua bajo los parámetros físicos, químicos y microbiológicos establecidos en el decreto 475 de 1.998. Solo el 55 % de los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano cuenta con algún proceso de tratamiento pero únicamente el 28 % de éstos, estuvo en armonía con el riesgo a tratar.

Tal situación empeora al considerar poblaciones pequeñas (menores a 12.500 personas) y áreas rurales, donde únicamente el 30 % de los sistemas tiene algún tipo de tratamiento, siendo adecuado en un 9 % de los sistemas.

En 1.997 Colombia tuvo 1.068 municipios; basados en la inspección de 641, el Ministerio de Salud, fundamenta que únicamente el 49 % (315) tiene facilidades de adecuado tratamiento, mientras que solo el 40 % (256) de los municipios inspeccionados tuvo agua tratada.

La gran mayoría de las plantas de tratamiento en Colombia están basadas en filtración rápida de agua con coagulantes químicos, sin embargo los requerimientos de administración, compra, transporte, depósito y correcta dosificación de los componentes químicos, limita fuertemente la aplicación de este tipo de tecnología.

* COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Encuesta de plantas potabilizadoras. Bogotá : El ministerio, 1.998. 78 p.

La filtración en múltiples etapas (FiME) que es una combinación de FLA y filtros en grava, es una tecnología que emerge como una solución para superar parte de las limitaciones de FLA. El desarrollo de la filtración en múltiples etapas empezó en Latinoamérica en 1.980 con prometedores resultados.

La integración de estas etapas de filtración permite el tratamiento de agua con niveles de contaminación más elevados que aquellos con que podría operar la tecnología de FLA, independientemente, sin sacrificar las bondades asociadas con sus bajos requerimientos de infraestructura física y de mano de obra con mínimo nivel de escolaridad, siendo la tecnología más recomendada para la zona rural.

Aunque muchas de las limitaciones existentes para la aplicación de FLA han podido ser superadas con la introducción de los sistemas de pretratamiento en gravas, aun persisten limitaciones que afectan una mejor aplicación de esta tecnología. Una de ellas lo constituye la corta duración de las carreras de filtración, lo cual demanda una alta dedicación del operador en labores de operación y mantenimiento.

De otra parte el componente de mayor peso porcentual en costos de inversión inicial lo tienen el FLA. Para 5 alternativas de FiME estudiadas*, el costo de FLA varía entre 37 y 55 %, indicando que la optimización de FLA produciría un mayor impacto en los costos de inversión del sistema.

Una opción para disminuir los costos de inversión inicial ha venido siendo estudiado en Inglaterra y Brasil y está asociado al uso de mantas sintéticas y naturales no tejidas como medios de protección y remoción de sólidos y turbiedad en las unidades de FLA.

El uso de la tecnología de filtración lenta en arena como tratamiento de aguas superficiales es particularmente efectivo en el mejoramiento de la calidad microbiológica del agua. Sin embargo, para que este tratamiento sea eficiente, se requiere de agua cruda con bajos niveles de turbiedad. De ahí la importancia del pretratamiento de las aguas superficiales con alto contenido de material sólido; sin embargo, estos procesos son inaplicables en muchos sistemas de abastecimiento de agua de países en vía de desarrollo ante la baja o mala capacidad de gestión de los entes administradores locales, por la inaccesibilidad de los químicos, lo inadecuado de los equipos de dosificación, lo difícil de los procesos de operación y mantenimiento, y también por la falta de capacitación y entrenamiento de los operadores.

La prefiltración es solamente una fase de tratamiento sencilla, eficiente y libre de químicos aplicada predominantemente para la remoción de sólidos. También es un proceso que mejora significativamente la calidad microbiológica del agua y ante la utilización de diferentes tamaños granulométricos como material filtrante, a los prefiltros se les denomina filtros gruesos. Similar a los filtros gruesos lentos de arena, los prefiltros también hacen un

* PROYECTO INTEGRADO de Investigación y Demostración en Filtración Múltiple por Etapas : Versión resumida. Cali : CINARA, 1.999. p. 19–25.

amplio uso de recursos locales y difícilmente requieren de equipos mecánicos para su operación y mantenimiento. Por consiguiente, la filtración gruesa es considerada una tecnología de prefiltración de uso apropiado para sistemas de tratamiento de aguas.

Diversos tipos de filtros han sido desarrollados con el fin de dar respuesta a diferentes calidades del agua cruda. Los filtros dinámicos son usados como una primera etapa de pretratamiento, seguida de filtros gruesos operados bien sea como filtros de flujo vertical u horizontal. De acuerdo con los conceptos de multi-barrera y tratamiento integrado, la aplicación de una serie de etapas sucesivas de prefiltración, constituyen una alternativa sostenible para la remoción de material sólido, constituyéndose además, en un método eficiente para el mejoramiento de la calidad microbiológica del agua.

Actualmente, los prefiltros y en particular los filtros gruesos son ampliamente usados en sistemas de abastecimiento de agua en numerosos países en vía de desarrollo, pero también están siendo empleados en plantas para recarga artificial de aguas subterráneas en países industrializados. La experiencia en proyectos a escala piloto y a escala real demuestra que los filtros dinámicos tienen la capacidad de reducir hasta en un 80 % la concentración de material sólido. Este material es reducido por los filtros gruesos hasta en un 90 % o, mejorando adicionalmente la calidad bacteriológica del agua; por ejemplo, con reducciones entre 1 y 2 unidades log de coliformes fecales*. Los filtros también reducen color verdadero en ciertos niveles, materia orgánica disuelta y otras sustancias presentes en aguas superficiales como hierro y manganeso. No obstante, las eficiencias reportadas, la remoción de suspensiones estables con grandes concentraciones de materia coloidal es difícil a través de filtros gruesos y, por tanto, la adición de coagulantes se hace necesaria. El uso combinado de filtros gruesos con filtros lentos con arena constituye un método de tratamiento confiable, sostenible y particularmente confiable en países en desarrollo. Sin embargo, la sola implementación de una determinada tecnología seguramente conduciría al fracaso.

La filtración gruesa, como pretratamiento, contribuye a la separación de sólidos finos no retenidos en estructuras de sedimentación simple que la pueden preceder. El efluente de los filtros gruesos debe contener menos de 2 a 5 mg/l de sólidos suspendidos (SS), para cumplir con los requerimientos de calidad de agua de los filtros lentos.

Los filtros de grava gruesa mejoran principalmente la calidad física del agua a medida que remueven los sólidos suspendidos y reducen la turbiedad. Sin embargo, también se puede esperar un mejoramiento de la calidad microbiológica del agua, pues las bacterias y los virus se pueden comportar como sólidos, con tamaños en el rango de 10 a 0,2 mm y de 0,4 a 0,002 mm respectivamente. Además, de acuerdo con literatura especializada**, estos organismos frecuentemente se adhieren mediante fuerzas electrostáticas a la superficie de otros sólidos suspendidos en el agua. Consecuentemente, una remoción de estos sólidos puede contribuir a su vez a una reducción de microorganismos, incluidos patógenos. La

* FILTRACIÓN EN Múltiples Etapas. Cali : CINARA, 1.992. p. 36

** LOODSRECHT, Van et al. Filtración Gruesa. s.l. : s.n., 1.990. p. 60

eficiencia de la filtración gruesa en la reducción de microorganismos puede estar en el mismo orden de magnitud que la de SS. Por ejemplo, una concentración a la entrada de 10-100 mg/l de SS, puede ser reducida por un filtro grueso al orden de 1-3 mg/l. El mejoramiento de la calidad bacteriológica del agua puede llegar, más o menos, del 60 al 99 %, o sea reducciones desde menos de una unidad logarítmica y hasta 2 log (Cinara-IRC, 1.992 y 1.996; Galvis et al, 1.993). Los patógenos más grandes, como protozoarios, quistes, helmintos, etc., son eliminados en una proporción aún mayor.

Los filtros gruesos se utilizan como pretratamiento de los filtros lentos en arena. Sin embargo, aun en presencia de muy bajos niveles de contaminación microbiológica, en los cuales podría obviarse, al menos temporalmente, la aplicación de la filtración lenta, la filtración gruesa podría ser necesaria en el caso de cargas altas, eventuales o permanentes, de sedimento, para evitar problemas con la desinfección terminal, en el almacenamiento o en las tuberías de distribución del agua.

1.2 EXPERIENCIAS EN UN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DEL INSTITUTO CINARA*

1.2.1 Descripción del proyecto. La evaluación fue realizada a nivel de planta piloto en la estación de investigación del Instituto Cinara – Universidad del Valle, en predios de la planta de tratamiento de agua para consumo humano de EMCALI, en Puerto Mallarino, en Cali, Colombia. La aplicación de los resultados obtenidos, fue realizada en una planta ya construida a escala real que utiliza como tecnología de tratamiento FiME La Estación está localizada en el valle geográfico del río Cauca, a una altura de 980 m.s.n.m. y una temperatura ambiental promedio de 24° C.

El agua cruda utilizada para el estudio corresponde al río Cauca, una fuente superficial de valle, la cual presenta un caudal promedio anual de 130 m³/s. Por el estado de su cuenca, cuenta con un gran arrastre de sólidos que genera turbiedad por encima de las 100 UNT, particularmente durante los períodos de lluvia. También presenta una gran contaminación de tipo microbiológico, por los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento que se vierten en el río.

La planta piloto utilizada en este estudio corresponde a un estudio FiME que utiliza pretratamientos con dos unidades de FGD_i, funcionando con velocidad de filtración de 3 m/h; el efluente de los FGD_i se mezcló y se distribuyó hacia tres opciones de filtros gruesos operando en paralelo, con velocidad de filtración de 0,30 m/h: un filtro grueso ascendente en serie (FGAS), un filtro grueso ascendente en capas (FGAC) y un filtro grueso descendente en serie (FGDS). El efluente de los filtros gruesos se mezcló y se distribuyó a

* FERNÁNDEZ J., SÁNCHEZ A. et al. Uso de fibras naturales y sintéticas en filtración lenta en Colombia. Cali : CINARA, 1.992. p. 22–25.

5 unidades de filtración lenta en arena, cuatro de ellas acondicionadas con una manta natural o sintética y uno sin manta utilizado como blanco.

Los filtros lentos utilizados en esta investigación fueron construidos en ferro-cemento, con diámetro interno de 2,0 m y altura total de 2,15 m. La arena utilizada en estas unidades presentaron un coeficiente de uniformidad de 2,35, tamaño efectivo de 0,22 mm y altura inicial del lecho de 0,8 m.

Los filtros lentos fueron operados a una velocidad de filtración de 0,15 m/h, sin embargo, se consideró un período de maduración inicial del filtro donde la velocidad de operación fue de 0,10 m/h. El período de maduración corresponde al tiempo en el cual los filtros lentos presentaron en su efluente niveles de coliformes fecales inferior a 10 UFC / 100 ml.

Para la evaluación seleccionaron dos mantas con fibra sintética y dos con fibra natural. En el caso de las mantas sintéticas se utilizaron las referencias NT-1.400 y NT-2.000, mientras que las naturales utilizaron material disponible en Colombia: el ecomusgo y la felpa.

Dos períodos de evaluación fueron realizados; en cada período se trató de arrancar las unidades piloto bajo las mismas condiciones de altura de lecho, contenido de lodo y velocidad de filtración.

La calidad del agua fue monitoreada tanto en el agua cruda como a la entrada y salida de las unidades estudiadas, con base a los parámetros turbiedad, color real, sólidos suspendidos y coliformes fecales. Para evaluar el comportamiento hidráulico de las unidades de FLA, se midió la pérdida de carga tanto en la manta como en diferentes alturas del lecho filtrante. Se consideró que la carrera de filtración finalizaba cuando el FLA alcanza una pérdida de carga de 0,70 m.

La aplicación a escala fue desarrollada en la planta FiME del club Shalom, localizada en el valle geográfico del río Pance, en la ciudad de Cali, a una altura de 980 m.s.n.m. y temperatura ambiente promedio de 24 ° C durante todo el año.

El agua cruda utilizada corresponde al río Pance, una fuente superficial de ladera, con caudal promedio anual de 2 m³/s. Su cuenca presenta alta intervención humana, particularmente los fines de semana, cuando es utilizada como sitio de recreación por unas 10.000 personas aproximadamente, alterando notablemente las características del agua cruda.

La planta FiME del club Shalom trata un caudal aproximado de 1 Lps, y tiene las siguientes estructuras de tratamiento: un filtro grueso dinámico, un filtro grueso ascendente en capas y dos filtros lentos de arena, que operan con una velocidad de operación de 1,5; 0,6 y 0,154 m/h, respectivamente.

Una de las dos unidades de FLA del club Shalom fue condicionada con 6 mantas sintéticas NT-2.000 de Pavco sobre lecho de arena, mientras que la otra se utilizó como blanco.

1.2.2 Presentación y discusión de resultados.

1.2.2.1 Calidad de agua cruda y pretratada. Durante la evaluación, el agua presentó niveles de turbiedad distintos para los dos períodos de evaluación. En el primer período, la turbiedad presentó un rango de calidad entre 450 y 50 UNT, con promedio de 125 UNT; mientras que en el segundo entre 790 y 14 UNT, con promedio de 65,8 UNT, lo que indica que en la región se presentaron dos períodos climáticos diferentes que afectaron la calidad del agua cruda. En ambos períodos los parámetros coliformes fecales, turbiedad, color real y sólidos suspendidos estuvieron muy por encima de los niveles máximos recomendados por Galvis et al 1.998 y Galvis 1.999, para el uso de la tecnología FiME en fuentes superficiales de valle.

Esta baja calidad presentada en el agua cruda originó que en el efluente del sistema de pretratamiento no se alcanzara los niveles deseables de turbiedad, sólidos suspendidos y color para ser tratado por los filtros lentos en arena.

A pesar de esta baja calidad de agua, los filtros lentos presentaron un período de maduración durante los primeros 43 días de operación. Durante este período, los coliformes fecales en el efluente de los FLA pasaron de un valor cercano a 1.000 UFC/100 ml a 10 UFC/100 ml, valor en el cual se conservó el resto de la carrera de filtración, llegando en algunos casos a 0 UFC/100ml.

En todos los 5 filtros, el comportamiento del proceso de maduración fue muy similar, y al parecer el efecto de introducción de manta no representó gran influencia sobre la duración del período de maduración, contrario a lo que podría suponerse con las mantas naturales, en las cuales se esperaría un proceso de maduración más rápido que en las sintéticas, dada la mayor cantidad de sustrato disponible para la formación de la capa biológica.

1.2.2.2 Calidad de efluente y eficiencia de los FLA.

1.2.2.2.1 Unidades convencionales de FLA. Las eficiencias aparecen en el cuadro 1.

1.2.2.2.2 Proyecto de investigación CINARA. Las unidades con manta natural alcanzaron una calidad de agua efluente, en los parámetros turbiedad y color, que en promedio cumple con la norma colombiana de agua potable* (5 UNT y 15 UPC respectivamente), mientras que las otras unidades presentaron promedios más elevados, siendo el FLA sin manta (FLA 5) quien presentó la peor calidad.

En la figura 1 se presentan los promedios de calidad de agua a la entrada y salida de los filtros lentos en los parámetros turbiedad, color y coliformes fecales, durante el período I. Aunque las reducciones de coliformes fecales son altas y la concentración en el efluente final puede ser considerado de bajo riesgo, acorde con OMS, 1.997 (promedio < 3

* COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Decreto 475. Bogotá : El ministerio, 1.998. 39 p.

Cuadro 1. Eficiencias típicas de tratamiento de unidades convencionales de filtración lenta en arena*

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 99,9 %	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.
COT	<15-25 %	COT, carbón orgánico total.
COA	<50 %	COA, carbón orgánico asimilable o biodegradable.
Precursores THM	<25 %	Precursores de trihalometanos.
Hierro, manganeso	30-90 %	Valores > 1 mg/l de Fe reducen carreras de filtración.

Fuente: Filtración en Múltiples Etapas. Cinara, 1.999. p. 55.

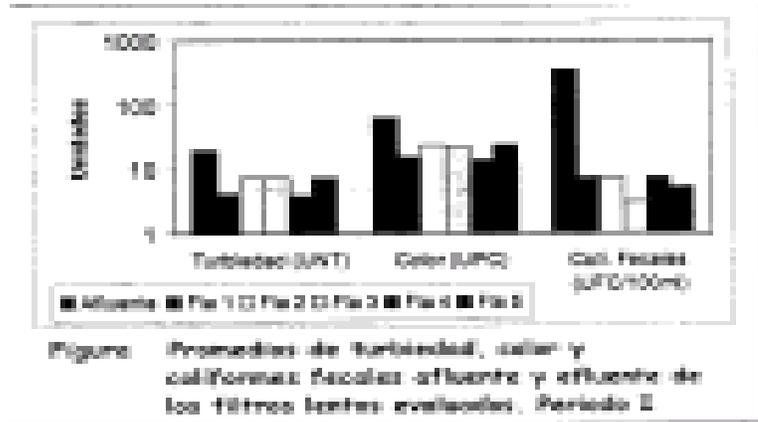
UFC/100ml y máximo < 25 UFC/100ml), con lo cual se podría aplicar la desinfección terminal como barrera de seguridad, sin embargo al considerar otros parámetros como la turbiedad y el color se encuentra que estos presentan niveles por arriba de los 5 UNT y de 15 UPC respectivamente, con una frecuencia mayor al 50 % en turbiedad y del 90 % en casos del color real.

Las eficiencias promedio alcanzadas por las diferentes unidades de tratamiento incluidas en la planta piloto, tanto para el período I como para el II, se presentan en el cuadro 2.

En general, estas remociones muestran que las unidades con mantas naturales presentan un mejor comportamiento en la remoción de los parámetros color real y turbiedad. Las

* BELLAMY et al. Filtración Lenta en Arena. s.l. : s.n., 1994. p. 12-30.

Figura 1. Promedios de turbiedad, color y coliformes fecales afluente y efluente de los filtros lentos evaluados. Período I.



Fuente: Filtración en Múltiples Etapas. Cinara, 1.999. p. 60

remociones encontradas, particularmente en el caso de las mantas sintéticas son similares a las encontradas por Galvis, 1.999 y Galvis et al 1.998, en filtros lentos de arena sin mantas, que operan con velocidad de operación de 0,15 m/h, lo cual indica que las mantas sintéticas, bajo las condiciones de operación que se presentaron durante la investigación no generan grandes impactos en el mejoramiento de la calidad del agua, mientras que las naturales logran un mejor impacto.

Una comparación estadística realizada tanto para la eficiencia de remoción como para el nivel de contaminación efluente, de los filtros lentos en turbiedad, color y coliformes fecales, confirman que en los parámetros turbiedad y color tanto para la eficiencia de remoción como por el nivel del parámetro, en los filtros lentos que utilizan mantas naturales presentan una mayor eficiencia de remoción y una menor contaminación que las unidades que utilizan mantas sintéticas, y que éstas respecto al filtro lento sin manta presentan efluentes con calidad muy similar.

Cuadro 2. Eficiencias de remoción parciales y acumuladas (proyecto Cinara).

Parámetros	FGDi	FG	FLA 1	FLA 2	FLA 3	FLA 4	FLA 5
PERÍODO I							
Turbiedad							
Parcial	22,8	80,47	78,76	63,73	63,21	80,83	63,73
Acumulada	22,8	84,92	96,80	94,53	94,45	97,11	94,53

Color Real	8,1	49,60	66,67	63,49	65,08	77,78	63,49
Parcial	8,1	53,68	84,56	83,09	83,82	89,71	83,09
Acumulada							
Sólidos Suspen.							
Parcial	51,50	98,05	90,00	86,67	85,67	93,33	83,33
Acumulada	51,50	98,71	99,87	99,83	99,82	99,91	99,79
Colif. Fecales							
Parcial	30,7	98,05	98,02	98,02	99,15	98,02	98,58
Acumulada	30,7	98,65	99,97	99,97	99,99	99,97	99,98
Reducción Parcial (Unid. Log)	0,37	3,94	3,92	3,92	4,77	3,92	4,26
Reducción acumulada (Unid. Log)	0,37	4,30	8,22	8,22	9,07	8,22	8,56
PERÍODO II							
Turbiedad							
Parcial	30,82	74,64	86,67	59,81	56,14	80,92	54,69
Acumulada	30,82	82,46	97,05	92,95	91,80	95,90	90,49
Color Real	18,00	59,76	71,43	57,58	54,29	72,50	51,26
Parcial	18,00	97,00	92,00	86,00	84,00	89,00	81,00
Acumulada							
Sólidos Suspen.							
Parcial	56,80	96,30	90,00	80,00	75,00	85,00	70,00
Acumulada	56,80	98,40	99,84	99,68	99,60	99,76	99,52
Colif. Fecales							
Parcial	64,50	97,66	90,00	80,00	99,68	99,20	99,32
Acumulada	64,50	99,17	99,994	99,997	99,997	99,991	9,993
Reducción Parcial (Unid. Log)	1,04	3,75	5,26	5,71	5,74	4,83	5,00
Reducción acumulada (Unid. Log)	1,04	4,79	9,80	10,50	10,50	9,40	9,58

Fuente: Filtración en Múltiples Etapas. Cinara, 1.999. p. 80.

En el caso de los coliformes fecales, los resultados del estudio estadístico indican que no existe evidencia para afirmar que se presentan diferencias significativas tanto en la eficiencia de remoción como en la concentración del efluente final en cada filtro.

1.3 UNIDADES EN UN PROCESO DE FILTRACIÓN MÚLTIPLE GRANULAR*

1.3.1 Filtro Grueso Dinámico (FGDi). Es considerado como la primera etapa de tratamiento pues su función se orienta a acondicionar la calidad del agua y proteger las unidades de tratamiento subsiguientes de altas cargas de material suspendido. Además de material sólido esta unidad ha demostrado remociones significativas en otros parámetros como coliformes fecales, hierro y manganeso, jugando así un papel importante en el mejoramiento de calidad de agua y contribuyendo al cumplimiento del concepto de multibarrera.

Los FGDi's generalmente se localizan dentro de la planta de tratamiento, porque así se facilita su control, operación y mantenimiento. Sin embargo, en sistemas de abastecimiento que posean líneas de conducción de agua cruda de corta longitud, las unidades de acondicionamiento pueden ser proyectadas en un sitio cercano a la captación e inmediatamente después del desarenador.

La diferencia de niveles de agua entre la superficie del lecho y el punto de descarga del caudal efluente no varía significativamente (energía disponible prácticamente constante); si la válvula que controla el caudal efluente no se manipula durante una carrera del filtro, el caudal acondicionado va declinando a medida que el lecho filtrante se va colmatando y eventualmente, dependiendo de la capacidad de transporte de sólidos de la fuente, todo el caudal captado puede regresar a la fuente, evitando así mayores problemas de operación en el sistema de abastecimiento. Esta capacidad de declinar más o menos bruscamente el caudal acondicionado es lo que ha dado origen al calificativo de **dinámico** en el nombre de esta tecnología.

Cuadro 3. Eficiencias de remoción encontradas en fuentes superficiales tratadas por filtros gruesos dinámicos (FGDi).

Parámetro	Reducción Típica
Sólidos Suspendidos Turbiedad	Entre el 70 y el 80%, con fuentes en el rango de 10 a 200 mg/l. Entre 30 y el 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.
Coniformes Fecales	Entre 50 y 80 %, para niveles de coliformes fecales en el agua cruda en el rango 2.000 a 100.000 UFC/100 ml y sólidos suspendidos entre 10 y 50 mg/l.

Fuente: Filtración en Múltiples Etapas. Cinara, 1.999. p. 118.

* WEGELIN M., GALVIS G. y MONTERO J. La filtración gruesa en el tratamiento de aguas superficiales. Cali : CINARA, 1.998. p. 84.

1.3.2 Filtro Grueso. Los filtros gruesos se utilizan principalmente para separar del agua los sólidos finos que no han sido retenidos en las cámaras preliminares de sedimentación. Actúan principalmente como filtros físicos reduciendo la concentración de material sólido, pero sin desconocer las importantes remociones en parámetros físico-químicos y microbiológicos.

Las grandes áreas superficiales del material filtrante favorecen el proceso de sedimentación que aunado a las bajas velocidades de filtración, contribuyen a la generación de otros procesos como adsorción, y procesos de tipo químico y biológico. En consecuencia, además de remover material sólido, algunos otros parámetros como color y materia orgánica disuelta son removidos en menor proporción.

Se ubican físicamente dentro de la planta de tratamiento y conforman el último proceso de tratamiento previo a la filtración lenta en arena. Estos filtros se clasifican con base en su función y sentido de flujo; entonces pueden ser operados con flujo ascendente, descendente u horizontal y las fracciones de grava requeridas pueden instalarse en compartimientos separados con diferentes tamaños en cada uno (operados en serie) o en un mismo compartimiento con tamaños de grava colocados en capas. La selección de un método apropiado de pretratamiento debe considerar los siguientes aspectos:

- Características y variabilidad del agua cruda.
- Tipo de fuente superficial.
- Características topográficas y geomecánicas en el área específica del proyecto.
- Aspectos económicos ligados a la comunidad de las instituciones.
- Características propias de la comunidad y capacidad de soporte institucional.

Para el presente estudio se aplica el **filtro grueso de flujo vertical**, el cual consta de una unidad filtrante. El agua que está siendo tratada fluye secuencialmente a través de los compartimientos que contienen el material filtrante, gradado de grueso a fino en la dirección del flujo. El rango de tamaño de grava está entre 25 y 4 mm. La grava se dispone en fracciones, por ejemplo, entre 25 y 19 mm para la primera, 19 y 13 mm para la segunda y 13 y 4 mm para la tercera.

Los filtros gruesos verticales pueden operar con flujo ascendente o descendente y ser abastecidos bien sea por la zona superior o por el fondo de la unidad, dependiendo del sentido del flujo seleccionado. El material filtrante debe estar completamente sumergido con una lámina de agua cercana a 0,10 m.

La filtración gruesa ascendente tiene la ventaja de favorecer la acumulación de sólidos en el fondo del filtro, donde se localiza el sistema de drenaje facilitando así, el lavado hidráulico o de fondo de las unidades. Adicionalmente la dirección vertical del flujo reduce interferencias generadas por temperatura o diferencias de densidad del fluido mejorando el comportamiento hidráulico de la unidad, evitando zonas muertas y produciendo tiempos de retención más homogéneos.

Cuadro 4. Eficiencias típicas de tratamiento por filtros gruesos ascendentes (FGAs)

Parámetro	Reducción 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 50 y 80 % en fuentes superficiales de valle, siendo mayores para los FGAs. En fuentes superficiales de ladera la remoción está en el rango 50 – 90 %.
Color Real	Entre 20 y 50 %.
Hierro y Manganeseo	Alrededor del 50 %.
Coliformes Fecales	Reducciones entre 0,65 y 2,5 unidades log, siendo mayor para FGAS tratando agua con contaminación bacteriológica en el rango de 20.000 a 100.000 UFC/100 ml y contenidos de sólidos suspendidos entre 20 y 200 mg/l. La menor eficiencia se presentó con fuentes de calidad bacteriológica entre 500 y 20.000 UFC/100 ml.

Fuente: Filtración en Múltiples Etapas. Cinara, 1.999. p. 130.

Básicamente un filtro grueso ascendente está compuesto de:

- Cámaras de filtración con uno, dos o tres compartimientos.
- Lecho filtrante.
- Estructuras de entrada y salida.
- Sistema de drenaje y cámara de lavado.
- Accesorios de regulación y control.
- Dispositivos para la limpieza superficial.

1.3.3 Geomembranas. Por tratarse de un tema relativamente reciente y focalizado inicialmente en estudios a escala piloto, no existen normas específicas que condicionen la realización de ensayos en filtros con mantas no tejidas utilizadas en el tratamiento de agua para consumo humano. A pesar de ésto, existe una gran tradición en el empleo de las mantas no tejidas como filtros en obras geotécnicas.

Aun así existen grandes diferencias con algunos tipos de obras geotécnicas, en los cuales las mantas son proyectadas previendo un tiempo de vida útil superior a 100 años, debido a la dificultad de sustituirlas y donde se exige alta resistencia a la degradación química y ambiental, sin perder sus propiedades físicas y mecánicas para las cuales fueron proyectadas. A diferencia, en estaciones de tratamiento de agua, una condición esencial para las mantas la constituye la facilidad de ser removidas para su limpieza o sustitución, una vez agotadas sus propiedades hidráulicas y mecánicas.

El uso de mantas no tejidas en los filtros lentos en arena es una alternativa que ha sido estudiada solo a nivel de laboratorio y escala piloto, presentando muy buenas perspectivas para la optimización del proceso en plantas de tratamiento que utilizan filtración lenta en arena, sin la necesidad de hacer grandes inversiones de capital.

En Inglaterra, Mbwette y Graham (1.990) estudiaron ampliamente las propiedades y características de diferentes tipos de mantas sintéticas encontrando que generalmente las mantas se pueden clasificar en dos grandes grupos, tejidas y no tejidas. Concluyen que las mantas tejidas no son apropiadas para FLA, pues poseen un espesor muy fino, una porosidad y área superficial específica muy bajas, por lo cual la probabilidad de remover partículas y almacenarlas es también baja en comparación con las mantas no tejidas, que presentan mejores características en este sentido.

Las mantas no tejidas pueden ser producidas por diferentes técnicas industriales, con diferentes materiales y diferentes diámetros de fibras. De ahí la gran variedad de mantas que pueden ser encontradas en el mercado. Las mantas no tejidas pueden ser clasificadas con base en el origen y procedencia de la materia prima a partir de las cuales son fabricadas.

Debido a factores tales como diversidad, menor precio y uniformidad en sus propiedades físicas, las fibras sintéticas son más comúnmente usadas en mantas no tejidas que las fibras naturales. De las sintéticas, las fibras de polipropileno son las más comúnmente empleadas debido a su bajo costo, resistencia a la abrasión, al calor, a la radiación ultravioleta, al ataque de compuestos como ácidos, alcalinizantes y agentes oxidantes; además, ausencia de grupos polares que facilitan su lavado.

Mantas no tejidas como medios filtrantes (Geotextil NT – 2.000). Aunque los modelos descriptivos de filtración en medios porosos y fibrosos son parecidos, estos dos medios presentan grandes diferencias en lo que se refiere a propiedades tales como: porosidad, permeabilidad, superficie específica, espesor y tamaño de los poros. El conocimiento de las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mantas no tejidas es esencial para su adecuada utilización en sistemas de filtración.

La durabilidad de las mantas sintéticas está relacionada con las propiedades de los polímeros de los cuales están fabricadas. Para cuantificar las propiedades de estos materiales, es necesario conocer su estructura a nivel molecular y químico.

Las propiedades hidráulicas y mecánicas de las mantas están directamente relacionadas con el tipo de fibra y/o filamento empleado y con la técnica utilizada en su producción.

Para el presente estudio se optó por utilizar la manta o geotextil no tejido NT– 2.000, la cual presenta las siguientes características o propiedades hidráulicas*:

* MANUAL DE especificaciones técnicas sobre geotextiles. Bogotá : PAVCO, 2.002. 12 p.

- Porosidad: generalmente mayor al 70 % y usualmente entre el 80 – 99 % (NT-2.000: 87,71 %).
- Conductividad hidráulica: debido a su alta porosidad, la conductividad hidráulica es considerablemente mayor a una arena típica utilizada en FLA (NT-2.000: 3,4 mm/s).
- Filtrabilidad: el coeficiente de filtración de la manta limpia depende de la superficie específica del diámetro y material de las fibras así como de la distribución de poros en la manta.
- Superficie específica: depende de la densidad de la manta; por poseer mayor superficie específica que la arena, es considerada un mayor medio filtrante. Los mejores resultados se han obtenido con mantas de superficie específica entre 10.000 y 20.000 m²/m³ (Graham et al, 1.994) (NT-2.000: 15.860 m²/m³).
- Tamaño de los poros y espesor: al aumentar el espesor de la manta, la distribución del tamaño de poros es controlada por los poros de menor tamaño. Mantas con múltiples capas que presenten estratificaciones porométricas y de conductividad hidráulica pueden mejorar la eficiencia hidráulica del conjunto total (Heerten et al, 1.985) (NT - 2.000: 1,70 mm).

1.4 PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

1.4.1 Turbiedad. Es un parámetro de vital importancia pues afecta tanto la aceptabilidad del agua a consumir, como la selección y eficiencia de los procesos de tratamiento, particularmente la eficiencia de la desinfección con cloro (aumenta su demanda y protege los microorganismos) y estimula el crecimiento bacterial.

La desinfección es de incuestionable importancia en el suministro de agua segura para el consumo humano. La destrucción de microorganismos patógenos es esencial y comúnmente involucra el uso de agentes químicos tales como el cloro. El uso de desinfectantes químicos usualmente resulta en la formación de subproductos, algunos de los cuales son potencialmente peligrosos, sin embargo los riesgos para la salud generados por tales subproductos son extremadamente pequeños en comparación con aquellos asociados con una inadecuada desinfección. Es importante que la desinfección no esté comprometida con compuestos que impliquen control de subproductos.

En todos los procesos en los cuales se incluye la desinfección, la turbiedad siempre debe ser baja, preferiblemente menor a 1 UNT. Se recomienda que la turbiedad en el agua al ser desinfectada sea consistentemente menor a 5 UNT e idealmente posea un valor medio menor a 1 UNT. La norma colombiana establece como valor admisible en el efluente antes de la desinfección, una turbiedad máxima de 5 UNT, con valor deseable £ 1 UNT.

Tomando en cuenta las eficiencias de turbiedad y su remoción en las diferentes alternativas FiME, se presentan tres rangos para la clasificación de la turbiedad:

- Rango bajo, con turbiedad promedio < 10 UNT, asociado con cuencas poco intervenidas, sin trazas de erosión y sin terrenos de uso agrícola que drenen directamente en la fuente.

- Rango intermedio, fuentes con turbiedades predominantes entre 10 y 20 UNT, con buenas posibilidades de tratamiento.
- Rango alto, turbiedad promedia entre 20 y 70 UNT, promedios superiores a este nivel requieren una investigación más profunda, particularmente en tamaño y distribución de partículas, que pueden tener un gran impacto sobre la eficiencia de FiME.

1.4.2 Color Real. El agua para consumo humano debería ser incolora. El color en aguas para bebida podría ser debido a la presencia de materia orgánica coloreada, v.g. sustancias húmicas, metales como hierro y manganeso o desechos industriales altamente coloreados. El color verdadero es una medida indirecta de ácidos fúlvicos y húmicos, los que en muchas circunstancias se constituyen en el material orgánico más abundante en aguas superficiales*. Dado que el cloro reacciona con la materia orgánica para formar subproductos de la desinfección potencialmente peligrosos, se discuten los efectos adversos sobre la salud humana. Sin embargo, la evidencia científica actual es inadecuada para concluir que la cloración del agua representa un riesgo significativo para los humanos (ILSI, 1.993).

Incertidumbre sobre la evidencia toxicológica disponible, limita diagnosticar los riesgos en la salud humana asociados con cloro, cloraminas, dióxido de cloro y desinfección con ozono. La evidencia epidemiológica sobre los incrementos en los riesgos de cáncer por agua clorada para consumo humano, es equivocada*.

En consecuencia, no hay duda que la prioridad de tratamiento por desinfección lo sigue constituyendo la remoción del riesgo microbiológico, no obstante la presencia de color verdadero en aguas para consumo humano, con valores superiores a 15 Unidades de Platino Cobalto (UPC) (WHO, 1.996).

El seguimiento y evaluación de proyectos a escala piloto y real con diferentes niveles de riesgo permiten suponer los siguientes rangos de calidad:

- Rango bajo, nivel de color en la fuente < 20 UPC
- Rango medio, nivel de color < 30 UPC
- Rango alto, nivel de color entre 30 y 40 UPC. Sin embargo, si la calidad de la fuente presenta niveles superiores a 40 UPC o entre 20 y 40 UPC pero con turbiedad < 10 UNT es conveniente efectuar estudios de tratabilidad a escala piloto, para establecer la viabilidad de tratamiento con FiME.

1.4.3 Sólidos Suspendidos. La limitación más comúnmente mencionada en relación con las unidades convencionales de filtración lenta en arena (FLA), utilizadas como única etapa de tratamiento, es su severa restricción para tratar fuentes de agua donde el material particulado supere niveles relativamente bajos. Este material puede crear condiciones ambientales adversas para la biomasa que actúa en los lechos de arena, para grupos de

* ELLIS; SPENCER y COLLINS. Tratamiento de agua para comunidades. s.l. : s.n., 1.991. p. 97.

protozoarios que predan bacterias y que contribuyen a pulir la calidad microbiológica del efluente. Sin embargo, no son estas posibles implicaciones de importancia sanitaria, sino las dificultades del tratamiento de fuentes donde predominen partículas pequeñas, de naturaleza coloidal o el impacto de las altas concentraciones de material particulado en la longitud de las carreras de filtración.

Si bien, no se presentan razones claras para justificar la longitud mínima de una carrera o ciclo de filtración; algunos autores consideran que debe ser mayor de 30 días, por factores de tipo económico u operacional (Hendricks, 1.991). Para prevenir efluentes con turbiedades elevadas, colmataciones de los lechos de arena demasiado frecuentes o ambientes desfavorables para la actividad microbiológica, se recomiendan diversos límites para la turbiedad en el afluente; éstos varían desde < 5 UNT (Cleasby, 1.984) o < 10 UNT (Hendricks, 1.991), hasta < 50 UNT (Ellis, 1.985; TSS, 1.987). Además, la mayoría de referencias aceptan, sin ser deseables, valores altos, en el rango de 50 a 120 UNT, siempre que sus duraciones sean inferiores a 1 ó 2 días. Sin embargo la turbiedad del agua, como único parámetro, no se considera una medida suficiente para identificar limitaciones asociadas con la duración de las carreras (Cleasby, 1.984). Si bien, la turbiedad por su sencillez, seguirá siendo un parámetro muy usado como indicador indirecto de la presencia de material particulado, se sabe que no refleja siempre bien la carga de sólidos que reciben los lechos filtrantes, especialmente cuando las partículas no son de naturaleza arcillosa o silíceas, como es el caso de algas o de flóculos de hierro. Como carga máxima de sólidos suspendidos (SS) existen pocas recomendaciones, una de ellas recomienda $SS < 5$ mg/l, con base en experiencias a escala piloto, utilizando suspensiones de caolín como fuente de agua a tratar (Wegelin, 1.986).

1.4.4 Coliformes Fecales. Los riesgos presentes para consumo humano asociados con la contaminación microbiológica, son tan importantes, que su control debe ser siempre una prioridad. En este sentido, para obtener una desinfección confiable en sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades, WHO (1.996) establece que el valor promedio de coliformes fecales debe ser < 3 y máximo < 25 UFC/100 ml. Después de la desinfección el valor de coliformes fecales debe ser 0 UFC/100 ml.

Considerando las experiencias adquiridas en los proyectos de investigación y desarrollo en Colombia, tratando aguas superficiales con la tecnología FiME, la siguiente clasificación de la calidad del agua es propuesta:

- Rango bajo, niveles de coliformes fecales menores a 500 UFC/100 ml los cuales parecen corresponder a una cuenca muy poco intervenida y con actividades humanas o de pastoreo.
- Rango intermedio, entre 500 y 10.000 UFC/100 ml, que según la inspección sanitaria parece estar relacionado con cuencas donde existen zonas de defecación a campo abierto; donde se genera arrastre de excretas directamente a la fuente durante el período de lluvias. En este rango no se considera ni el vertimiento de aguas residuales

a la fuente, ni la presencia de zonas con pastoreo intenso, ni sitios de recreación masiva.

- Rango alto, se considera entre 10.000 y 20.000 UFC/100 ml, que corresponde a cuencas con alta intervención humana y descargas directas de agua residual doméstica.

1.5 NORMAS VIGENTES

1.5.1 Decreto 475 de 1.998 (capítulo III). Hace referencia a las:

Normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable.

Las normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable establecidas en el presente decreto rigen para todo el territorio nacional y deben cumplirse en cualquier punto de la red de distribución de un sistema de suministro de agua potable.

1.5.1.1 Normas de calidad organolépticas, físicas y químicas. Se enfocan en los artículos 7 y 10:

Artículo 7. Los criterios organolépticos y físicos de la calidad del agua potable son los siguientes:

CARACTERÍSTICAS EXPRESADAS EN VALOR ADMISIBLE:

Color verdadero. Unidades de Platino Cobalto (UPC) ≤ 15

Turbiedad. Unidades nefelométricas de turbidez (UNT) ≤ 5

Artículo 10. El valor para el potencial de hidrógeno, pH, para el agua potable deberán estar comprendidos entre 6,5 y 9,0.

1.5.1.2 Normas microbiológicas. Se referencian en los artículos 24, 25 y 26:

Artículo 24. Los métodos aceptados para análisis microbiológico del agua son los siguientes:

Para Escherichia Coli: Filtración por membrana y sustrato definido.

Para Coliformes Totales: Filtración por membrana y sustrato definido.

Artículo 25. El agua para consumo humano debe cumplir con los valores admisibles desde el punto de vista microbiológico (cuadro 5).

Parágrafo primero. Los resultados de los análisis microbiológicos se deben reportar en las unidades de NMP / 100 cm³ (número más probable), si se utiliza la técnica del número más

Cuadro 5. Valores admisibles desde el punto de vista microbiológico (artículo 25).

Técnica utilizada	Filtración por membrana	Sustrato definido	Tubos múltiples de fermentación "aceptable hasta el año 2.000"
Microorganismos indicadores			
Coliformes totales	0 UFC/100 cm ³	0 microorganismos / 100 cm ³	< 2 microorganismos / 100 cm ³
Escherichia coli	0 UFC/100 cm ³	0 microorganismos / 100 cm ³	Negativo

Fuente: Decreto 475 de 1.998 (capítulo III)

probable o la técnica enzimática de sustrato definido y en UFC/100 cm³ (unidades formadoras de colonia), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

Parágrafo segundo. Se recomienda un valor máximo admisible de 100 Unidades Formadoras de Colonias (U.F.C.) por 100 centímetros cúbicos (cm³), para microorganismos mesófilos, como prueba complementaria de la calidad del agua desde el punto de vista microbiológico.

Artículo 26. Ninguna muestra de agua potable debe contener E-coli en 100 cm³ de agua, independientemente del método de análisis utilizado.

1.5.2 Norma RAS – 2.000 - capítulo C.3. Los diseños de los filtros dinámico y grueso ascendente se realizarán con base en las especificaciones de las normas RAS-2.000, título C. (literal C.3.5.2.3.)

1.5.2.1 Generalidades. Los **filtros gruesos dinámicos** se pueden emplear para reducir la cantidad de sólidos en suspensión o para controlar los picos de turbiedad de corta duración. Son tanques que deben tener poca profundidad, con una capa de grava fina (con Te de 3 mm a 6 mm) y una intermedia (con Te de 6 a 13 mm) sobre un lecho de grava más grueso (con Te de 13 mm a 25 mm) y un sistema de drenaje en el fondo. El conducto de desagüe de esta cámara debe tener diámetro y pendiente suficiente para permitir la evacuación del agua de lavado. Los **filtros gruesos de flujo vertical ascendente** pueden estar constituidos por una o varias unidades en serie, las cuales deben contener el material grueso granular de diferentes diámetros, con una graduación que debe ir de grueso a fino en la dirección del flujo, que alterna de abajo hacia arriba en una unidad y de arriba hacia abajo en la siguiente. La unidad debe tener un dren amplio para remover rápidamente el volumen de agua en el filtro. Se pueden distinguir dos tipos de filtración; la filtración gruesa ascendente en capas (FGAC) cuando los lechos son instalados en una misma unidad y la filtración gruesa ascendente en serie (FGAS) cuando los lechos de grava son instalados en dos o más unidades, cada una con un tamaño predominante. En la selección del número de unidades, velocidad de filtración y longitud del lecho filtrante, debe tenerse en cuenta el riesgo

sanitario relacionado con el agua cruda, la eficiencia de remoción de la unidad y los requerimientos de calidad de agua efluente.

1.5.2.2 Velocidad de filtración. Para garantizar la correcta remoción de sólidos en los prefiltros, estas unidades deben trabajar en los rangos establecidos en el cuadro 6.

Cuadro 6. Velocidad de filtración para cada tipo de filtro

Tipo de prefiltro	Velocidad de filtración
Filtros gruesos dinámicos	2 - 3 m/h
Filtros gruesos de flujo horizontal	0,3 – 1,5 m/h
Filtros gruesos de flujo vertical ascendente	0,3 – 0,7 m/h
Filtros gruesos de flujo vertical descendente	0,3 – 0,7 m/h

Fuente: RAS – 2.000. (capítulo C.3, p. C. 31)

1.5.2.3 Velocidad de lavado. Para garantizar el máximo de remoción de los sólidos en el medio filtrante durante el lavado, los filtros gruesos dinámicos deben diseñarse de forma que la velocidad de lavado en esta unidad esté entre 0,15 m/s y 0,3 m/s.

1.5.2.4 Altura del agua sobrenadante. Para garantizar que el nivel del agua sobre el lecho filtrante sea adecuado para facilitar la filtración, los filtros gruesos de flujo ascendente deben diseñarse de forma que la altura del agua sobrenadante sea aproximadamente 0,2 m.

1.5.2.5 Composición del medio filtrante. Se especifica de la siguiente manera:

- a) Los filtros gruesos dinámicos deben estar constituidos por un lecho con tres capas de grava, cuyos tamaños deben variar entre 3 mm y 25 mm en la dirección del flujo. La capa fina debe ubicarse en la superficie, en contacto directo con el agua cruda. Las otras capas pueden ser consideradas más como lecho de soporte que como medio filtrante, debido a su mayor tamaño.
- b) En los filtros gruesos de flujo ascendente, el lecho filtrante debe estar constituido por 5 capas de grava, las cuales pueden estar distribuidas en 1, 2 ó 3 compartimientos. Sus tamaños deben variar entre 25 mm y 4 mm en la dirección del flujo. Los primeros 0,2 m a 0,4 m de grava en contacto con el sistema de drenaje constituyen el lecho de soporte, cuyo diámetro debe variar según el tamaño de la capa de grava presente en cada unidad y con el diámetro de los orificios del múltiple.
- c) Las características de la arena, la antracita, la grava, entre otros materiales que se emplean como lechos filtrantes están definidas en la Norma Técnica Colombiana NTC 2.572.

1.5.2.6 Espesor del medio filtrante. En el cuadro 7 se presenta el espesor recomendado para cada uno de los prefiltros según el medio filtrante.

Cuadro 7. Profundidad o longitud del medio filtrante

Tipo de prefiltro	Espesor del medio filtrante
Filtros gruesos dinámicos	0,4 – 0,6 m
Filtros gruesos de flujo horizontal (longitud)	0,8 – 1,6 m
Filtros gruesos de flujo vertical ascendente	0,85 – 1,25 m

Fuente: RAS – 2.000 (capítulo C.3, p. C. 31)

1.5.2.7 Calidad del agua tratada. El agua para consumo humano no debe contener microorganismos patógenos, ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Por tanto, el agua para consumo debe cumplir los requisitos de calidad microbiológicos y fisicoquímicos exigidos en el Decreto 475 de marzo 10 de 1.998, expedido por el Ministerio de Salud. La calidad del agua no debe deteriorarse ni caer por debajo de los límites establecidos durante el período de tiempo para el cual se diseñó el sistema de abastecimiento.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 HIPÓTESIS DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta los antecedentes respecto a la utilización de geotextiles en la filtración múltiple por etapas (FiME)*, precisamente en la última, es decir, en el filtro lento en arena, se ha observado una filtración 4,4 veces mayor que en la arena (con una manta de área específica de aprox. 20.000 m²/m³), representando un mayor incremento en la filtrabilidad. Esto sugiere que las mantas sintéticas no tejidas son un medio de filtración más eficiente que la arena. Por lo tanto, cabe la posibilidad de que una manta permita sustituir la última etapa de un proceso de FiME consiguiendo unos resultados satisfactorios en cuanto a la remoción de turbiedad, color y coliformes fecales y, de esta manera, reduciendo considerablemente la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento posteriores. Para este estudio se optó por utilizar una manta o geotextil sintético no tejido NT-2.000 considerando su mayor comercialidad y economía en el mercado.

2.2 INFORMACIÓN PRELIMINAR

2.2.1 Revisión bibliográfica. Se revisó la información existente acerca del tratamiento de aguas crudas para abastecimiento público correspondiente a la filtración múltiple por etapas (FiME) y filtración múltiple utilizando geomembranas, con la cual se buscó adquirir un conocimiento general acerca de los parámetros de diseño de los filtros dinámico y grueso ascendente para posteriormente realizar el sistema de filtración piloto adicionando el geotextil NT - 2.000.

Por otro lado, a través de la consulta de trabajos de grado tanto en la secretaría de la Facultad de Ingeniería como en la biblioteca de la universidad se encontraron títulos que hacen referencia a las siguientes temáticas:

- Uso de geotextil y otros materiales en el proceso de filtración lenta en arena como una de las etapas en unidades de prefiltración en sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano, utilizando captación dinámica.
- Uso de geotextil y otros materiales en el proceso de captación dinámica o filtro grueso dinámico como una etapa en unidades de prefiltración.

En cuanto a los geotextiles utilizados se encontraron los no tejidos # 1.600 y # 2.500, además de otros materiales como la arena de peña, entre otros.

* FILTRACIÓN EN Múltiples Etapas : Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Cali : CINARA, 1.999. p. 38.

Se observa que, principalmente, los trabajos de grado realizados en la facultad utilizando geotextiles se han encaminado a implementarlos en la última unidad del proceso de filtración múltiple por etapas (FiME), es decir, al final del filtro lento en arena el cual, en la presente investigación, se elimina con el fin de enfocar el estudio hacia una nueva alternativa de prefiltración. Además, los resultados obtenidos cuando el geotextil se implementó en la captación dinámica no fueron muy satisfactorios por lo que se hace necesario averiguar qué pasa si éste se coloca en la segunda unidad de un proceso FiME, es decir, al final del filtro grueso.

No se encontró ningún trabajo de grado con la implementación de geotextiles u otros materiales en el filtro grueso en un proceso FiME, teniendo en cuenta, además, que el director, el ing. Roberto Salazar, asegura que esta investigación no se ha llevado a cabo anteriormente de esta manera, por cuanto a que él siempre ha dirigido trabajos de este tipo en la facultad.

2.2.2 Referencias adquiridas de otras fuentes. Principalmente referencias tomadas de proyectos acerca del uso del geotextil en los procesos de filtración múltiple que permitan ser comparadas con los resultados definitivos al culminar todas las etapas del presente estudio en cuanto a la eficiencia de la geomembrana ubicada en el filtro granular.

A continuación se anota la *bibliografía* encontrada de trabajos de grado en los cuales se implementaron geotextiles:

- BOLAÑOS DELGADO, Milton Jesús. Uso de geotextil y otros materiales en procesos de filtración lenta en arena para pequeñas comunidades: captación dinámica. Pasto 1.997. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.
- BURBANO CERÓN, Magdely Stella. Uso de geotextil y otros materiales en procesos de filtración lenta en arena para pequeñas comunidades: filtración lenta en arena. Pasto 1.997. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.
- CASTRO URRESTA, Ruth Elena y TÉLLEZ SALAS, Eliana Karina. Uso de geotextil y otros materiales en procesos de filtración lenta en arena para pequeñas comunidades: prefiltración. Pasto 1.997. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.
- CERÓN, Raymundo. Filtros para pequeñas poblaciones. Pasto 1.996. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.
- ESPAÑA CASTILLO, María Eugenia. Uso del geotextil y otros materiales en procesos de filtración lenta en arena. Pasto 1.993. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- GARCÍA ESPAÑA, Patricia y VELA, Ana Cristina. Usos del geotextil y otros materiales en los procesos de filtración lenta en arena. Pasto 1.993. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- GÓMEZ, Alberto A. y BETANCOURT, Jorge. Filtros para poblaciones menores de 5.000 habitantes. Pasto 1.993. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- INSUASTY PORTILLA, William René y PABÓN ESTUPIÑÁN, Gabriela Andrea. Uso del geotextil en unidades de pretratamiento para pequeñas comunidades. Pasto 1.993. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- MELO SÁNCHEZ, Claudia Marcela y VALLEJO FRANCO, César Augusto. Utilización del geotextil no tejido # 1.600 y arena de peña en procesos de potabilización de agua por filtración lenta: prefiltros. Pasto 1.999. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- PÉREZ, Arturo. Evaluación técnica de los sistemas de filtración lenta en arena en nuestro medio. Pasto 1.986. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- PÉREZ TOVAR, Edgar Darío. Utilización del geotextil no tejido # 1.600 y arena de peña en procesos de potabilización de agua por filtración lenta. Pasto 1.999. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

- SOLARTE ORTIZ, Romel Wilson. Utilización del geotextil no tejido # 1.600 y arena de peña en procesos de potabilización de agua por filtración lenta: captación dinámica. Pasto 1.999. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería.

2.3 INSPECCIÓN - RECONOCIMIENTO DEL SITIO DE TRABAJO

El agua tomada para la presente investigación corresponde a la fuente que abastece al acueducto de Mijitayo. Para esto, se dispuso de una manguera colocada antes de la captación de este acueducto, la cual se dirige hasta el filtro piloto, que se ubicó en una casa, a 200 m del punto de toma. Se decidió trabajar con esta fuente debido a sus características iniciales de calidad del agua, ya que se encontró un alto contenido de turbiedad, color y sólidos suspendidos, lo cual permitiría medir las eficiencias de remoción de una manera más palpable y clara.

2.4 DISEÑO DEL FILTRO PILOTO

Para la primera fase del proyecto de investigación, consistente en el diseño, construcción y puesta en marcha del filtro piloto para Filtración Múltiple Granular (FMG) con geomembrana ha sido necesario definir los parámetros que permitan realizar el diseño del

filtro piloto, a partir de algunas experiencias llevadas a cabo por parte del Cinara y de las disposiciones de la norma RAS – 2.000.

La información recopilada por parte de dicha entidad y la documentación revisada durante la elaboración del anteproyecto fueron de valiosa utilidad puesto que proporcionaron una base de apoyo y avance en el diseño de los filtros grueso dinámico (FGDi) y filtro grueso de flujo vertical ascendente (FGAs), para así garantizar un funcionamiento óptimo por parte de los mismos.

2.4.1 Captación de la fuente y conducción al sistema. Para ofrecer un suministro permanente se hizo necesario diseñar la toma mediante un sistema de sifón (debido a la topografía de la zona) que conduzca el agua hasta el sistema de filtración piloto a través de una manguera de gran flexibilidad y que presente la menor pérdida por fricción.

La instalación de la conducción estuvo a cargo del dueño del predio, cubriendo una longitud aproximada de 200 m. En el sitio de captación, para garantizar un suministro permanente, se hizo necesario un anclaje seguro en el lecho del río utilizando dos varillas, en el sector de mayor profundidad y menor turbulencia (remanso).

En el punto de entrada del agua al sistema se colocó una válvula de apertura lenta para regular o controlar el caudal de llegada, ya que esta misma conducción también alimentó, además del filtro piloto, un dispensador de riego que estuvo siendo trasladado diariamente hacia diferentes puntos de la propiedad.

Para el filtro piloto, el caudal a manejar es:

$$Q_d = 0,01 \text{ Lps} = 0,00001 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Con este dato, es necesario determinar el diámetro adecuado para el conducto alimentador del sistema de filtración piloto. *Se tiene en cuenta que este diseño corresponde al tramo final de toda la conducción, es decir, para la longitud definida después de la derivación que tiene la manguera hacia el dispensador de agua mencionado anteriormente y el filtro.* Se diseña utilizando una manguera de 100 m de longitud que transporte 0,01 Lps de agua, en la cual se debe vencer una carga de 5 m debida a las pérdidas por fricción a temperatura ambiente. El peso específico del agua es de 1.000 kg/m^3 y la viscosidad dinámica de $0,0001001 \text{ kg.s/m}^2$.

A partir de las investigaciones experimentales de Darcy, Weisbach y Poiseuille se tiene la siguiente expresión:

$$V = \frac{S_f \cdot \gamma \cdot D^2}{32 \cdot \mu} \quad \text{donde:}$$

V : velocidad del fluido
 S_f : pendiente de fricción ($S_f = h_f / L$)
 h_f : pérdida por fricción
 L : longitud del conducto
 γ : peso específico del fluido
 D : diámetro del conducto
 μ : viscosidad dinámica del fluido

$$\text{Como } Q = V \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \Rightarrow D = \frac{(128 \cdot \mu \cdot Q)^{1/4}}{(\pi \cdot \gamma \cdot S_f)^{1/4}}$$

$$S_f = \frac{h_f}{L} = \frac{5 \text{ m}}{100 \text{ m}} = 0,05$$

$$D = \frac{(128 * 0,0001001 \text{ kg.s/m}^2 * 0,00001 \text{ m}^3/\text{s})^{1/4}}{(\pi * 1.000 \text{ kg/m}^3 * 0,05)^{1/4}}$$

$$D = 0,0053 \text{ m} = 0,53 \text{ cm}$$

Por lo tanto, el diámetro mínimo que puede instalarse es de 0,21". Se asume $D = 1/4''$ u otro mayor, de tal manera que puedan superarse, además de la pérdida por fricción, las pérdidas locales de energía debidas a la presencia de empalmes, curvas (cambios de dirección), de la válvula reguladora de caudal y pérdida por salida.

$$D_{\text{instalado}} = 1/2'' \text{ (manguera).}$$

De esta manera, se dispuso que la manguera que abastece el dispensador tenga un diámetro de $3/4''$ (disposición del dueño de la propiedad), mientras que la del tramo que se deriva de la anterior y que abastece el filtro piloto sea de $1/2''$.

2.4.2 Diseño del filtro grueso dinámico (FGDi). Se dispone de 1 módulo con flujo descendente vertical. En la *zona de entrada* se coloca una plaqueta con una serie de orificios de $\Phi 1/2''$ en la zona más profunda para uniformizar el flujo; dicha plaqueta genera dos cámaras rectangulares que permiten la disipación de energía (primera cámara) y un nivel de agua uniforme sobre los lechos filtrantes (gracias a una distancia adicional de 10 cm. -segunda cámara-). En la *zona de salida* existe un vertedor de rebose cuya cresta está entre 0,03 y 0,05 m por encima del nivel superficial de grava (la resistencia hidráulica se incrementa hasta alcanzar la cresta de rebose).

El caudal de entrada se controla mediante una válvula de regulación, pero éste es superior al caudal de diseño y, por consiguiente, existe un caudal de excesos en la estructura de rebose; lo anterior con el fin de garantizar un nivel de agua por encima de los estratos de grava. La velocidad de filtración es determinada utilizando la válvula de salida del FGDi,

generando pérdida de energía de tal manera que el efluente de esta unidad corresponda al caudal de diseño; de esta manera se consigue establecer de una manera sencilla un control de caudal que normalmente no requiere mucha manipulación del operador.

Se tienen en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- Velocidad de filtración (Vf) : 2 – 3 m/h
- Velocidad superficial de lavado (Vs) : 0,15 – 0,3 m/s
- Area de filtración (Af) < 10 m²
- Altura lechos de grava : 0,4 – 0,6 m
- Pérdida de carga < 0,01 m
- Altura lecho de soporte >= Φconducto recolector pral.
- Tamaño grava en contacto con colectores laterales > Φorificios en ese colector

Para el filtro piloto se adopta:

- Velocidad de filtración (Vf) : 2 m/h
- Altura sobrenadante de agua : 0,03 m
- Altura total de los lechos de grava : 0,60 m
- Número de unidades : 1
- Período de operación : 24 h/d
- Caudal de diseño : 0,01 Lps

- Zona de filtración

Se entra a dimensionar el área superficial –de filtración- de la unidad Af (m²). Está condicionada al menos por el caudal de diseño y la velocidad de filtración seleccionada Vf (2 m/h, para este caso).

Por lo tanto:

$$Q = V * A \quad \Rightarrow \quad Af = Qd / Vf$$

Con Qd = 0,01 Lps y Vf = 2 m/h :

$$\Rightarrow Af = \frac{0,036 \text{ m}^3/\text{h}}{2 \text{ m/h}} = 0,018 \text{ m}^2$$

Af = a * l ; adoptando una relación 1 : 3 (ancho: largo) del área superficial -de filtración- se tiene:

$$\begin{aligned} a &= 0,078 \text{ m} = 7,80 \text{ cm} \\ l &= 0,234 \text{ m} = 23,40 \text{ cm} \end{aligned}$$

Se ajustan las dimensiones así:

$$a = 8,0 \text{ cm}$$

$$l = 24,0 \text{ cm,}$$

conservándose la relación ancho: largo (1: 3) y disminuyéndose, escasamente, la velocidad de filtración:

$$V_f = \frac{Q_d}{A_f} = \frac{0,036 \text{ m}^3/\text{h}}{0,08 * 0,24 \text{ m}^2} = 1,90 \frac{\text{m}}{\text{h}} \approx 2 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Para cumplir con $V_f = 2 \text{ m/h}$ se puede incrementar el Q_d muy levemente a 0,0107 Lps, que en la práctica es análogo al caudal adoptado inicialmente. Por lo tanto, se continúa diseñando con:

$$Q_d = 0,01 \text{ Lps}$$

- *Lechos filtrantes*

En cuanto a la disposición de los lechos filtrantes para un filtro grueso dinámico, a partir de los parámetros de la norma RAS – 2.000, se tiene el cuadro 8:

Cuadro 8. Disposición de los lechos filtrantes en el FGD*i*.

Posición en la unidad	Espesor de la capa (m)	Tamaño de grava (mm)
Superior	0,20	3,0 - 6,0
Intermedio	0,20	6,0 - 13,0
Inferior (fondo)	0,20	13,0 - 25,0

Fuente: RAS – 2.000 (capítulo C.3, p. C. 28)

2.4.3 Diseño del filtro grueso de flujo ascendente (FGAs). Se dispone de 1 módulo o unidad con flujo ascendente vertical. En la *zona de salida* se coloca un vertedero de rebose que genere 10 cm de agua sobrenadante (cresta a 10 cm por encima de la superficie del lecho filtrante) y dirija el caudal filtrado hacia la estructura o cámara de salida.

Basados en la norma RAS – 2.000 y en experiencias con unidades experimentales y plantas a escala real desarrolladas por Cinara–IRC, se tienen los siguientes parámetros de diseño:

- Velocidad de filtración (V_f) : 0,3 – 0,7 m/h
- Altura sobrenadante de agua : 0,1 – 0,2 m
- Altura (o profundidad) de los lechos de grava : 0,85 – 1,25 m
- Ancho máx. filtro : 4,5 m
- A superficial (filtración) \leq 20 – 30 m²

- Longitud total lecho filtrante : 0,6 – 0,9 m
- Longitud lecho soporte total : 0,3 – 1,25 m

Para el filtro piloto se adopta:

- Velocidad de filtración (Vf) : 0,4 m/h
- Altura sobrenadante de agua : 0,1 m
- Altura total de los lechos de grava : 1,25 m
- Número de unidades : 1
- Período de operación : 24 h/d
- Caudal de diseño : 0,01 Lps

Durante la carrera de filtración y con lecho limpio, se genera una diferencia dinámica entre el nivel de agua en la cámara de entrada y la superficie del agua en el filtro cuyo valor debe ser igual a la sumatoria de pérdidas 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 progresiva del filtro. El incremento de pérdida de carga es compensado con el aumento en el nivel de agua en la cámara de entrada al filtro grueso.

- Máx. pérdida de carga = 0,30 m

- *Zona de filtración*

Se entra a dimensionar el área superficial –de filtración- de la unidad Af (m²). Está condicionada al menos por el caudal de diseño y la velocidad de filtración seleccionada Vf. Tomando una Vf = 0,4 m/h (pequeña para una mejor eficiencia) se desea obtener un diámetro del Af alrededor de 12” ≈ 30 cm. Por lo tanto:

$$Af = \pi * d^2 / 4 = \pi * (30 \text{ cm})^2 / 4 = 706,86 \text{ cm}^2 = 0,0707 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} Qd &= Vf * Af = 0,4 \text{ m/h} * 0,0707 \text{ m}^2 \\ &= 0,0283 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 0,0079 \text{ Lps} = 0,47 \text{ l/min} = 28,27 \text{ l/h} \end{aligned}$$

Con Qd = 0,01 Lps = 0,036 m³/h y Vf = 0,4 m/h:

$$Af = \frac{Qd}{Vf} = \frac{0,036 \text{ m}^3/\text{h}}{0,4 \text{ m/h}} = 0,09 \text{ m}^2$$

Como se optó por construir un filtro redondo, se tiene:

$$\Phi_f = 1,128 \sqrt{Af} = 1,128 \sqrt{0,09 \text{ m}^2} = 0,34 \text{ m} = 33,85 \text{ cm}$$

- Lechos filtrantes

En cuanto a los estratos de filtración se tiene que para sistemas conformados por una sola unidad, el filtro va empacado con lechos de grava de diferente tamaño en el rango de gruesa en el fondo, a fina en la superficie (cuadro 9):

Cuadro 9. Lecho filtrante recomendado en el FGAs.

Tamaño de grava (mm)	Altura (m)
19 – 25	0,30
13 – 19	0,20
6 – 13	0,15
3 – 6	0,15
1,6 – 3	0,10
Total (m):	
- Lecho soporte	0,30
- Lecho filtrante	0,60

Fuente: RAS – 2.000 (capítulo C.3, p. C. 28)

2.4.4 Diseño de múltiples (según Hudson). Según la experiencia adquirida en el diseño de este tipo de unidades se admite, en múltiples difusores:

$$R : a/A \quad (\text{relación de áreas})$$

$$V_P \leq V_L, \quad , \quad \text{en múltiples difusores.}$$

$$V_P \leq 0,5 V_L, \quad \text{en múltiples recolectores, \quad donde:}$$

V_P : velocidad en la tubería principal

V_L : velocidad en la tubería lateral

Se tienen en cuenta las recomendaciones dadas por Fair et al, (1.981) sobre criterios de diseño de múltiples usados para la recolección de agua filtrada y que también sirven para la distribución del agua de lavado (cuadro 10).

2.4.4.1 Recolectores múltiples en el FGDi. A partir de las dimensiones del FGDi:

$$a = 8,0 \text{ cm}$$

$$l = 24,0 \text{ cm}$$

Se diseña el sistema múltiple recolector.

Cuadro 10. Criterios de diseño de múltiples difusores y recolectores

Item	Recolector	Difusor
$R_o = S$ área orificios/área de lecho	0,0015 – 0,005	0,0015 – 0,005
$R_l = S$ área orificio/área lateral	0,3 – 0,8	0,4 – 1,0
$R_p = S$ área lateral/área principal	0,3 – 0,8	0,4 – 1,0
Diámetro orificios (mm)	6 – 19	6 – 19
Espaciamiento entre orificios (m)	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3
Espaciamiento entre laterales (m)	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0

Fuente: Filtración en Múltiples Etapas. Cinara, 1.999. p. 186.

Para este caso se toma como caudal de diseño el de filtración, ya que el lavado del filtro se hace manualmente sin considerar las pérdidas que se generan en el sistema múltiple recolector durante esta operación. Por lo tanto, el diseño corresponde únicamente como sistema recolector durante la filtración.

$$Q_d = 0,01 \text{ Lps}$$

Considerando un principal de 22 cm de largo e instalando 4 laterales, el espaciamiento entre ellos es de 12 cm y el caudal por lateral (q_L) es:

$$q_L = \frac{Q_d}{4} = \frac{0,01 \text{ Lps}}{4} = 0,0025 \text{ Lps}$$

Asumiendo una relación $R_o = 0,005$ (según recomendación de Fair):

$$R_o = \frac{\sum \text{Area orificio}}{\text{Area del lecho}} = \frac{n \cdot A_0}{A_L}$$

$$A_{LE} = 8,0 * 24,0 \text{ cm}^2 = 192,0 \text{ cm}^2$$

Para orificios de $\Phi^{1/4}$:

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,635 \text{ cm})^2}{4} = 0,3167 \text{ cm}^2$$

$$0,005 = \frac{n * 0,3167 \text{ cm}^2}{192,0 \text{ cm}^2}$$

Por lo tanto, el número de orificios por lateral es 0,76 ($n_L = 1$). Por seguridad, para evitar obstrucción por lodos se asume $n_L = 3$ orificios por lateral.

El diámetro del lateral puede ser calculado así:

$$\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_L^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot n_L$$

El diámetro del lateral sería entonces:

$$\begin{aligned} d_L &= \sqrt{\frac{n_L}{3}} \cdot d_0 \\ d_L &= \sqrt{3} \cdot 0,635 \text{ cm} \\ d_L &= 1,10 \text{ cm} = 0,43'' \quad \text{Se adopta } \frac{1}{2}'' \end{aligned}$$

El diámetro de la tubería principal del recolector puede calcularse así:

$$R_p = 0,8 \text{ (según recomendación de Fair)}$$

$$\text{Como } R_p = \frac{N \cdot A_L}{A_p} \quad \text{Con N como el número de áreas de tubería lateral que se conectan a la tubería principal.}$$

Por lo tanto, $N = 4$ y:

$$\begin{aligned} R_p \cdot A_p &= N \cdot A_L \\ 0,8 \cdot d_p^2 &= 4 \cdot d_L^2 \\ d_p &= 2,24 \cdot d_L \\ d_p &= 2,24 * \frac{1}{2}'' \\ d_p &= 1,12'' \quad \text{Se adopta } 1'' \end{aligned}$$

Los orificios en cada tubería lateral se pueden ubicar alternados a la izquierda y derecha a 45° respecto a la horizontal y el espaciamiento centro a centro es de 1 cm.

Para drenaje se instala, a la salida del FGD_i, sobre la tubería principal, una tee (1x½) con una válvula tipo globo de Φ ½'', y al final de la principal, otra válvula (de paso) de Φ 1''.

2.4.4.2 Difusor y recolector múltiple en el FGAs. A partir de las dimensiones del FGAs:

$$\Phi_{\text{CILINDRO}} = 33,85 \text{ cm} \quad \text{Se diseña el sistema múltiple recolector (de drenaje).}$$

$$\text{Velocidad de lavado} = 20 \text{ m/h} \quad \text{(recomendación dada por Hudson)}$$

El caudal total de lavado (Q) es:

$$Q = V \cdot A = 20 \text{ m/h} * \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (0,3385 \text{ m})^2$$

$$= 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$= 0,50 \text{ Lps}$$

Considerando un principal de 33 cm de largo e instalando 4 laterales, el espaciamiento entre ellos es de 11,28 cm y el caudal por lateral (q_L) es:

$$q_L = Q/4 = 0,50 \text{ Lps} / 4 = 0,125 \text{ Lps}$$

Asumiendo una relación $R_0 = 0,005$:

$$R_0 = \frac{\sum \text{Area orificio}}{\text{Area del lecho}} = \frac{n \cdot A_0}{A_L}$$

$$A_{LE} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \Phi_{CILINDRO}^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (33,85 \text{ cm})^2 = 899,93 \text{ cm}^2$$

Para orificios de $\Phi \frac{1}{4}$ ":

$$A_0 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_0^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (0,635 \text{ cm})^2 = 0,3167 \text{ cm}^2$$

Entonces:

$$0,005 = \frac{n \cdot 0,3167 \text{ cm}^2}{899,93 \text{ cm}^2}$$

Por lo tanto, el número de orificios por lateral es 3,55, adoptándose $n_L = 4$. El diámetro del lateral puede ser calculado así:

$$\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_L^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot n_L$$

$$d_L = \sqrt{n_L} \cdot d_0$$

$$d_L = \sqrt{4} \cdot 0,635 \text{ cm}$$

$$d_L = 1,27 \text{ cm} = 0,5'' = \frac{1}{2}''$$

El diámetro de la tubería principal del recolector puede calcularse así:

$$\text{Como } R_p = \frac{N \cdot A_L}{A_p} \quad R_p = 0,8 \text{ (recomendación dada por Fair)}$$

$$N = 4$$

$$R_p \cdot A_p = N \cdot A_L$$

$$0,8 \cdot d_p^2 = 4 \cdot d_L^2$$

$$d_p = 2,24 \cdot d_L$$

$$d_p = 2,24 \cdot \frac{1}{2}''$$

$$d_p = 1,12'' \quad \text{Se adopta } 1''$$

Al final de la tubería principal que sale del FGAs se coloca una válvula tipo globo de $\Phi 1''$.

2.4.5 Determinación de pérdidas de energía en los múltiples.

2.4.5.1 En el múltiple recolector del FGDi. Las pérdidas se calculan teniendo en cuenta el caudal de diseño, es decir, durante el proceso de filtración.

$$Q_d = 0,01 \text{ Lps}$$

Durante la filtración los caudales son pequeños y por tal motivo este proceso no es el más desfavorable (pequeñas pérdidas de energía).

Se calcula la pérdida de energía a la entrada por los orificios del múltiple recolector.

$$Q_{\text{LATERAL}} = Q_d / 4 = 0,01 \text{ Lps} / 4 = 0,0025 \text{ Lps}$$

Son 3 orificios por lateral; entonces, el caudal por orificio es:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 0,0025 \text{ Lps} / 3 = 0,00083 \text{ Lps} \\ &= 8,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

La pérdida por entrada al orificio es:

$$h_0 = \frac{Q_0^2}{(C.A_0)^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot g}$$

$$h_0 = \frac{(8,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s})^2}{(0,61 \cdot 7,92 \times 10^{-6} \text{ m}^2)^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,00152 \text{ m}$$

$$h_0 = 0,152 \text{ cm}$$

En la tubería principal se producen pérdidas de energía por fricción; se utiliza la expresión de William y Hazen:

$$V = 0,355 \cdot C_H \cdot D^{0,63} \cdot S_f^{0,54}$$

$$j_P = \frac{Q^{1,85}}{(0,2788 \cdot C_H \cdot D^{2,63})^{1,85}}$$

C_H : coeficiente que depende del material del tubo (150 para PVC).

Q : caudal en m^3/s

D : diámetro en m

j : pérdida de energía en m/m

NOTA: para este caso es más conveniente usar la expresión de William y Hazen, la cual es de tipo empírico, ya que permite obtener resultados más ajustados que cuando se aplican fórmulas logarítmicas para ciertos intervalos poco usuales, como en este caso, al usar un caudal relativamente pequeño. Por lo tanto:

$$j_p = \frac{(0,00001 \text{ m}^3/\text{s})^{1,85}}{[(0,2788 * 150 * (0,0254 \text{ m})^{2,63})^{1,85}]}$$
$$= 0,0000325 \text{ m/m} = 0,00325 \text{ cm/m}$$

Considerando una longitud de tubería principal de 27 cm, la pérdida de energía total en esa tubería es:

$$J_p = 0,27 \text{ m} * 0,00325 \text{ cm/m}$$
$$J_p = 0,00088 \text{ cm}$$

En cada una de las tuberías laterales también hay pérdidas por fricción. El caudal por lateral es:

$$Q_L = Q_d / 4 = 0,00001 \text{ m}^3/\text{s} / 4 = 0,0000025 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$j_L = \frac{Q_L^{1,85}}{(0,2788 * C_H * d_L^{2,63})^{1,85}}$$
$$j_L = \frac{(0,0000025 \text{ m}^3/\text{s})^{1,85}}{[(0,2788 * 150 * (0,0127 \text{ m})^{2,63})^{1,85}]}$$
$$j_L = 0,000073 \text{ m/m} = 0,0073 \text{ cm/m}$$

Con $L_L = 2,70 \text{ cm}$:

$$J_L = 0,027 \text{ m} * 0,0073 \text{ cm/m}$$
$$J_L = 0,0002 \text{ cm}$$

Debido a la ampliación de sección que ocurre entre las tuberías laterales y la principal se genera una pérdida local de energía que se determina así:

$$h_a = K_a \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

El coeficiente K_a depende de la brusquedad de la ampliación
Considerándola de tipo brusca:

$$\begin{aligned}
 K_a &= [(A_2/A_1) - 1]^2 = [(d_p^2/d_L^2) - 1]^2 \\
 &= [(1^2/1/2^2) - 1]^2 \\
 &= 9
 \end{aligned}$$

Las velocidades en los dos tubos son iguales:

$$V_L = \frac{0,0000025 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2} = 0,0197 \text{ m/s} = V_P$$

$$\Rightarrow h_a = 9 * \frac{(0,0197 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,00018 \text{ m}$$

$$h_a = 0,018 \text{ cm}$$

Pérdida de energía por cambio de dirección:

$$h_d = K_d \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_d = 0,6 \text{ (Gráfica de Hoffman)}$$

$$h_d = 0,6 * \frac{(0,0197 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,000012 \text{ m}$$

$$h_d = 0,0012 \text{ cm}$$

Pérdida de energía a través de la tee (1x 1/2):

$$h_t = K_t \cdot \frac{V_P^2}{2 \cdot g} \quad K_t = 0,5 \text{ (Tee de paso directo)}$$

$$h_t = 0,5 * \frac{(0,0197 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,00001 \text{ m}$$

$$h_t = 0,001 \text{ cm}$$

Pérdida de energía local por válvula tipo globo:

$$h_c = K_c \cdot \frac{V_P^2}{2 \cdot g} \quad K_c = 10 \text{ (Válvula de globo abierta)}$$

$$h_c = 10 * \frac{(0,0197 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,0002 \text{ m}$$

$$h_c = 0,020 \text{ cm}$$

En la descarga del agua al final de la tubería principal (al medio ambiente), se produce pérdida de energía:

$$h_m = \frac{V_p^2}{2 \cdot g} = \frac{(0,0197 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,00002 \text{ m}$$

$$h_m = 0,002 \text{ cm}$$

La pérdida de energía total en el FGD_i debido al sistema de múltiples recolectores es:

$$h_T = 0,20 \text{ cm}$$

2.4.5.2 En el múltiple difusor del FGAs. Se calcula la pérdida de energía desde la entrada de agua al sistema a través de tubería de $\Phi \frac{1}{2}$ ". Se dispone de una cámara rectangular que permita realizar toma de muestras con una altura de sumergencia $h_s = 8 \text{ cm}$.

Primero, se hace el cálculo de las pérdidas de energía por fricción en la tubería de entrada de $\Phi \frac{1}{2}$ " utilizando la fórmula de William y Hazen:

$$Q_d = 0,01 \text{ Lps}$$

$$j = \frac{Q^{1,85}}{(0,2788 \cdot C_H \cdot D^{2,63})^{1,85}}$$

$$j = \frac{(0,00001 \text{ m}^3/\text{s})^{1,85}}{[(0,2788 * 150 * (0,0127 \text{ m})^{2,63}]^{1,85}}$$

$$j = 0,00095 \text{ m/m} = 0,095 \text{ cm/m}$$

Considerando una longitud total de tubería de 1,10 m:

$$J = 1,10 \text{ m} * 0,095 \text{ cm/m} = 0,104 \text{ cm}$$

Ahora se calculan las pérdidas de energía locales.

A la entrada al tubo de $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$h_e = K_e \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_e = 0,5$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 0,00001 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2}$$

$$V = 0,0789 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow h_e = 0,5 \cdot \frac{(0,0789 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,000159 \text{ m}$$

$$h_e = 0,0159 \text{ cm}$$

En el codo a 90°:

$$h_c = K_c \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_c = 2,2$$

$$h_c = 2,2 \cdot \frac{(0,0789 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,0007 \text{ m}$$

$$h_c = 0,070 \text{ cm}$$

En la válvula (antes de la ampliación):

$$H_v = K_v \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_v = 5 \text{ (válvula de paso abierta)}$$

$$h_v = 5 \cdot \frac{(0,0789 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,0016 \text{ m}$$

$$h_v = 0,159 \text{ cm}$$

En la ampliación de diámetro de ½" a 1":

$$h_a = K_a \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad \begin{aligned} K_a &= [(A_2/A_1) - 1]^2 \text{ (ampliación brusca)} \\ K_a &= [(d_2^2/d_1^2) - 1]^2 = [(1^2/1/2^2) - 1]^2 \\ K_a &= 9 \end{aligned}$$

La mayor velocidad ocurre en la tubería de $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$h_a = 9 \cdot \frac{(0,0789 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,00286 \text{ m}$$

$$h_a = 0,286 \text{ cm}$$

Ahora, se procede a calcular las pérdidas en el múltiple difusor, comenzando con la tubería principal de longitud 25 cm y $\Phi 1$ "; se tiene:

$$j = \frac{Q^{1,85}}{(0,2788 \cdot C_H \cdot D^{2,63})^{1,85}}$$

$$j = \frac{(0,00001 \text{ m}^3/\text{s})^{1,85}}{[(0,2788 * 150 * (0,0254 \text{ m})^{2,63}]^{1,85}}$$

$$j = 0,0000325 \text{ m/m} = 0,00325 \text{ cm/m}$$

Con $L = 0,25 \text{ m}$, entonces:

$$J = 0,25 \text{ m} * 0,00325 \text{ cm/m} = 0,0008 \text{ cm}$$

Luego se produce una reducción de sección entre la tubería principal y las laterales.

$$h_r = K_r \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_r = 0,47 \text{ (según curva de Weisbach para contracción brusca).}$$

Las velocidades en las tuberías principal y laterales son iguales:

$$V_L = \frac{4 \cdot Q_L}{\pi \cdot d_L^2} = \frac{4 * 0,0000025 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,0127 \text{ m})^2} = 0,02 \text{ m/s} = V_P$$

$$\Rightarrow h_r = 0,47 \cdot \frac{(0,02 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,000009 \text{ m}$$

$$h_r = 0,0009 \text{ cm}$$

También hay pérdida de energía por cambio de dirección:

$$h_d = K_d \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_d = 0,6 \text{ (gráfica de Hoffman)}$$

$$h_d = 0,6 \cdot \frac{(0,02 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,000012 \text{ m}$$

$$h_d = 0,0012 \text{ cm}$$

En los tubos laterales por fricción:

$$j = \frac{Q_L^{1,85}}{(0,2788 \cdot C_H \cdot d_L^{2,63})^{1,85}}$$

$$j = \frac{(0,0000025 \text{ m}^3/\text{s})^{1,85}}{[(0,2788 * 150 * (0,0127 \text{ m})^{2,63}]^{1,85}}$$

$$j = 0,000073 \text{ m/m} = 0,0073 \text{ cm/m}$$

Con $L = 0,12 \text{ m}$, entonces:

$$J = 0,12 \text{ m} * 0,0073 \text{ cm/m} = 0,00087 \text{ cm}$$

A la salida a través de los orificios de $\Phi 1/4''$:

$$h_s = K_s \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad K_s = 1,0$$

La velocidad de salida es:

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} = \frac{0,000000625 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (0,00635 \text{ m})^2} = 0,02 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow h_s = \frac{(0,02 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,00002 \text{ m}$$

$$h_s = 0,002 \text{ cm}$$

Por lo tanto, la pérdida de energía debida al múltiple difusor y a la conducción en tubería de $\Phi 1/2''$ es:

$$h_T = 0,64 \text{ cm}$$

2.4.6 Pérdida de energía (carga) en los lechos filtrantes.

2.4.6.1 Para el filtro grueso dinámico (FGDi). Las pérdidas de carga en el medio filtrante se pueden calcular mediante la expresión de Huisman:

$$H_f = \frac{0,00608 \cdot V_f \cdot L_0}{d^2}, \quad \text{donde:}$$

H_f : pérdida de carga en el lecho filtrante, en cm

V_f : velocidad de filtración, en cm/s

L_0 : espesor o altura de la capa filtrante, en cm

d : diámetro de las partículas del material filtrante, en cm

Según la norma RAS – 2.000, el espesor total del lecho filtrante está entre 0,4 y 0,6 m; adoptando 0,60 m, cada capa o lecho tiene una altura de 0,20 m.

$$V_f = 2 \text{ m/h} = 0,056 \text{ cm/s}$$

Lecho superior:

$$\begin{aligned} L_{0-1} &= 20 \text{ cm} \\ d_1 &= 0,45 \text{ cm (medio)} \end{aligned} \quad H_{f-1} = \frac{0,00608 \cdot 0,056 \cdot 20}{0,45^2}$$

$$H_{f-1} = 0,0336 \text{ cm}$$

Lecho intermedio:

$$\begin{aligned} L_{0-2} &= 20 \text{ cm} \\ d_2 &= 0,95 \text{ cm (medio)} \end{aligned} \quad H_{f-2} = \frac{0,00608 \cdot 0,056 \cdot 20}{0,95^2}$$

$$H_{f-2} = 0,0075 \text{ cm}$$

Lecho inferior (fondo):

$$\begin{aligned} L_{0-3} &= 20 \text{ cm} \\ d_3 &= 1,90 \text{ cm (medio)} \end{aligned} \quad H_{f-3} = \frac{0,00608 \cdot 0,056 \cdot 20}{1,90^2}$$

$$H_{f-3} = 0,0019 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow H_{f,T} = 0,0430 \text{ cm}$$

2.4.6.2 Para el filtro grueso de flujo ascendente (por capas) (FGAs). Utilizando la expresión de Huisman:

$$H_f = \frac{0,00608 * V_f * l_o}{d^2}$$

$$V_f = 0,4 \text{ m/h} = 0,011 \text{ cm/s}$$

El espesor total varía entre 0,85 y 1,25 m (Norma RAS – 2.000). Adoptando el mayor especificado (1,25 m), se tiene:

Lecho inferior (de soporte):

$$\begin{array}{l} l_{o1} = 35 \text{ cm} \\ d_1 = 2,2 \text{ cm} \end{array} \quad H_f = \frac{0,00608 * 0,011 * 35}{(2,2)^2} = 0,0005 \text{ cm}$$

2º. lecho:

$$\begin{array}{l} l_{o2} = 30 \text{ cm} \\ d_2 = 1,6 \text{ cm} \end{array} \quad H_f = \frac{0,00608 * 0,011 * 30}{(1,6)^2} = 0,0008 \text{ cm}$$

3º. lecho:

$$\begin{array}{l} l_{o3} = 20 \text{ cm} \\ d_3 = 0,95 \text{ cm} \end{array} \quad H_f = \frac{0,00608 * 0,011 * 20}{(0,95)^2} = 0,0015 \text{ cm}$$

4º. lecho:

$$\begin{array}{l} l_{o4} = 20 \text{ cm} \\ d_4 = 0,45 \text{ cm} \end{array} \quad H_f = \frac{0,00608 * 0,011 * 20}{(0,45)^2} = 0,0066 \text{ cm}$$

Lecho superior:

$$\begin{array}{l} l_{o5} = 20 \text{ cm} \\ d_5 = 0,23 \text{ cm} \end{array} \quad H_f = \frac{0,00608 * 0,011 * 20}{(0,23)^2} = 0,0253 \text{ cm}$$

Lecho para fijación del geotextil:

$$\begin{array}{l} l_{o6} = 5 \text{ cm} \\ d_6 = 0,23 \text{ cm} \end{array} \quad H_f = \frac{0,00608 * 0,011 * 5}{(0,23)^2} = 0,0063 \text{ cm}$$

NOTA: esta capa de material de espesor 5 cm se utiliza para mantener el geotextil sin ningún tipo de movimiento (fijo respecto a su posición inicial).

Pérdida total (sin incluir el geotextil).

$$H_{fT} = 0,041 \text{ cm}$$

2.4.7 Pérdida de energía en el geotextil (NT – 2.000). La pérdida de energía en el geotextil se determina experimentalmente en el filtro piloto mediante el uso de piezómetros localizados antes y después del mismo. También se ubica un tubo piezométrico que permita la toma de muestras entre los estratos (lechos) 2° y 3°.

3. PLANTA EXPERIMENTAL PILOTO

3.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

La *planta experimental piloto* se encuentra localizada junto al desarenador del acueducto de Mijitayo, en una casa-finca de propiedad del señor Luis Jesús Imbaquín (vía a Obonuco), con coordenadas rectangulares N 1° 12' 17'', W 77° 18' 15''. Este lugar fue escogido debido a su cercanía con la quebrada Mijitayo antes de la bocatoma del acueducto, previa instalación de una manguera que transporta el agua cruda de la quebrada hasta la finca, vigilancia permanente del sitio, dando seguridad tanto para el filtro piloto como para las herramientas, aislamiento de personas ajenas al lugar, niños y animales (propiedad privada), libertad para realizar la operación y mantenimiento del filtro en las horas programadas durante todos los días, espacio libre para trabajar y realizar los drenajes correspondientes sin ningún tipo de inconveniente, entre otras ventajas.

3.2 FUENTE DE ABASTECIMIENTO

El filtro experimental piloto se abastece de agua cruda de la quebrada Mijitayo (antes de la bocatoma del acueducto). Su escogencia se fundamentó, principalmente, en el enfoque final que se le da al proyecto de investigación una vez concluidas todas sus etapas, que es la de realizar una comparación detallada de los resultados de calidad del agua que se obtienen con la planta de tratamiento de Mijitayo respecto a los obtenidos al culminar la investigación. Lo anterior con el fin de analizar resultados VS costos de tratamiento para el sistema en estudio y una planta de tratamiento real y completa (objetivo para mediano o largo plazo).

Previamente fue observado (visualmente) el comportamiento de algunos parámetros físicos de la fuente, concluyendo que durante los episodios lluviosos, la turbiedad, el color y los sólidos en suspensión aumentaban dramáticamente, situación que sería de gran utilidad para la presente investigación.

Sin embargo, el filtro piloto puede estar sujeto a ser cambiado de lugar, una vez se finalice el estudio en Mijitayo, para ser abastecido por otras fuentes como, por ejemplo, la de Centenario, entre otras, según criterio del director del trabajo de grado para posibles etapas de desarrollo adicionales del proyecto de investigación.

3.3 CAPTACIÓN DE LA FUENTE Y CONDUCCIÓN AL SISTEMA

El agua cruda se conduce a través de una manguera de diámetro ¾" y 100 m de longitud (primer tramo). Faltando 100 m para llegar al filtro piloto (segundo tramo con manguera de diámetro ½") se realizó una derivación utilizando una tee de PVC (¾ X ½ X ¾) para llevar caudal hasta el filtro. Un tercer tramo de manguera (Φ ¾") continúa hacia el dispensador del sistema de riego de la finca.

La toma se realiza a través de una malla metálica (en la punta de la manguera) para evitar la entrada de elementos que arrastra el agua (ramas, piedras, etc.) y que podrían causar obstrucciones.

3.4 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

El caudal de operación del filtro piloto está sujeto a los criterios de diseño del mismo, basados en la norma RAS – 2.000 y experiencias del Cinara. Se lleva a cabo el control del caudal a la entrada del filtro piloto con el fin de asegurar un correcto funcionamiento del mismo. Se aplica el método volumétrico. Este control debe realizarse periódicamente debido a que el dispensador de riego es trasladado de lugar continuamente, variando el caudal a la salida de la manguera (entrada al filtro).

Es importante recalcar que el caudal de diseño se chequea a la salida del filtro grueso dinámico (FGDi), utilizando una válvula (tipo globo), por medio de la cual se generan pérdidas de energía que permiten que la velocidad de filtración sea la de diseño evitando, así, escurrimiento no uniforme del agua a través de los lechos filtrantes.

3.5 ETAPAS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL FILTRO PILOTO

3.5.1 Estructura en acrílico. Para la elaboración de la estructura de los filtros se optó por utilizar acrílico que permita la observación de los estratos granulares y de la geomembrana, además del funcionamiento interno de los mismos. Por economía fue necesario contar con los servicios de una fábrica de acrílicos en la ciudad de Bogotá.

Una vez definidas todas las dimensiones de los filtros dinámico y grueso de flujo ascendente se procedió a construir la estructura utilizando láminas de acrílico (calibre 5 mm) que deben ser capaces de resistir el peso de los lechos de grava, así como la presión del agua. Se colaboró durante el proceso de corte de las láminas y modelación de los filtros en la fábrica Fibercril en la ciudad de Bogotá. Se optó por construir un molde en lámina de acero inoxidable con una serie de aros de madera al diámetro de diseño del FGAs y con una altura de 1,55 m. Utilizando un horno industrial de gran tamaño se moldearon cada uno de los filtros. Este proceso tuvo una duración de tres semanas más cinco días de transporte.

Para el montaje de los filtros se construyó un andamio metálico anticorrosivo de acuerdo a los requerimientos del diseño.

3.5.2 Tuberías, mangueras, accesorios y múltiples difusores – recolectores. A continuación de lo anterior se procedió a la construcción de los múltiples (recolector y difusor) utilizando tubería de PVC según diseño previo, además de la instalación de tubería y algunas válvulas ubicadas en lugares específicos que permitan realizar una correcta operación y mantenimiento del sistema, así como un muestreo representativo.

Al construir los múltiples (difusores y recolectores) se garantizó la hermeticidad en las uniones entre el tubo principal y los laterales, realizando cortes precisos y utilizando un

pegante para PVC. Además, se sellaron los extremos de los laterales (puntas). Para los drenajes de las cámaras de entrada y salida de los filtros se instalaron mangueras flexibles de Φ 1/2" y, para los lavados de fondo, se instalaron válvulas tipo globo para apertura – cierre rápido que generen golpe de Ariete.

Adicionalmente a los filtros se construyó un recipiente de 8 X 8 cm² de base y 45 cm de altura, que permite la regulación visual de las pérdidas de energía en el filtro grueso de flujo ascendente (FGAs), permitiendo un ascenso del nivel hasta de 30 cm, sin incluir la pérdida de energía inicial.

Finalmente, se perforaron unas pequeñas mangueras y se unieron a racores incrustados en las paredes del FGAs para poder realizar la toma de muestras y las mediciones de pérdida de energía en el geotextil (antes y después del mismo), además de otro dispositivo semejante colocado a la mitad de la altura total de los lechos de grava de este filtro.

En la figura 2 se muestra la estructura en acrílico montada sobre su andamio, una vez fue terminado el proceso de ensamblaje de la tubería, mangueras y demás accesorios del filtro piloto.

Figura 2. Filtro piloto (estructura en acrílico, andamio y tubería).



Se observa la manguera alimentadora con su válvula reguladora de caudal en la parte superior del andamio, junto al FGD_i. En el extremo inferior derecho del anterior está su válvula de lavado y, a continuación, el recipiente de medida de las pérdidas de energía en el FGAs. Para este último fue necesario utilizar unas abrazaderas metálicas que ayuden al

acrílico a resistir la presión del agua y grava; aquí se encuentra lleno de agua para la prueba de estanqueidad.

3.5.3 Obtención, tamizado y lavado de la piedra de río. Fue necesario viajar a Pilcuán (vía Pasto - Ipiales) para obtener piedra del río Guáitara. Se hizo un tamizado inicial para evitar transportar piedra de tamaño no requerido. Luego, se realizó un tamizado definitivo a partir de las siguientes especificaciones (cuadros 11 y 12):

Cuadro 11. Especificaciones de tamizado para la grava del FGD_i.

Posición en La unidad	Tamaño de grava (mm)	Tamices utilizados	Volumen (cm ³)
Superior	3,0 - 6,0	#8 - 1/4"	3.840
Intermedio	6,0 - 13,0	1/4" - 1/2"	3.840
Inferior (fondo)	13,0 - 25,0	1/2" - 1"	3.840

Fuente: Cuadro 8 y cálculos previos.

Cuadro 12. Especificaciones de tamizado para la grava del FGAs.

Posición en La unidad	Tamaño de grava (mm)	Tamices utilizados	Volumen (cm ³)
Lecho sup.+ fijación	1,6 - 3	#16 - #8	22.498
2°. lecho	3 - 6	#8 - 1/4"	17.999
3°. lecho	6 - 13	1/4" - 1/2"	17.999
4°. lecho	13 - 19	1/2" - 3/4"	26.998
Inferior (soporte)	19 - 25	3/4" - 1"	31.497

Fuente: Cuadro 9 y cálculos previos.

Una vez definida la granulometría se procedió a lavar lo mejor posible la piedra. La gravilla fue la más dispendiosa durante este proceso. En las figuras 3 y 4 se observan los estratos filtrantes de grava tanto para el FGD_i como para el FGAs.

Para los dos filtros, la grava de mayor tamaño se encuentra en la parte inferior y, la más fina, arriba. Al FGD_i se le está realizando la prueba de estanqueidad. El FGAs está listo para la instalación del geotextil sobre la gravilla.

Figura 3. Estratos filtrantes de grava en el FGD_i



Figura 4. Estratos filtrantes de grava en el FGAs



3.5.4 Puesta en marcha del sistema. Una vez construido o montado todo el sistema de filtración se procedió a la puesta en marcha.

Inicialmente, antes de introducir la grava (solamente con las unidades de acrílico, la tubería ensamblada y sus accesorios), se realizó una prueba de estanqueidad durante 2 días llenando con agua los filtros hasta los niveles máximos; a partir de esta prueba se detectaron algunas fugas en las uniones acrílico-tubería PVC, por lo cual fue necesario vaciar el sistema, dejar secar y sellar los imperfectos con silicona y pegante para PVC; lo anterior debió repetirse hasta lograr una perfecta estanqueidad. Superado lo anterior, se procedió al vaciado de cada uno de los estratos de grava y gravilla limpia y seca, cumpliendo con los espesores definidos a partir de las recomendaciones del Cinara y norma RAS – 2.000, para finalmente instalar el geotextil y, de esta manera, aforar el caudal para comenzar el llenado del sistema con agua proveniente de la quebrada Mijitayo.

Cabe resaltar que el geotextil fue recortado al diámetro del FGAs y fijado a las paredes de acrílico utilizando silicona, con la precaución de no dejar ningún espacio por el cual pueda filtrarse el agua sin pasar por el geotextil. Sobre éste se colocó un espesor de 5 cm de gravilla (la más fina) para que sirva de soporte adicional o fijación del mismo (figura 5).

La manguera perforada que se observa sobre el geotextil permite realizar mediciones de pérdida de energía en esta unidad; es decir, se dispuso de tubos piezométricos antes y después del geotextil para este fin.

Figura 5. Disposición del geotextil NT – 2.000 en el FGAs



Dos horas después de la puesta en marcha se observó que el agua sobrenadante en el FGAs se saturó de impurezas (turbiedad, color y sólidos), por lo cual fue necesario dejar el sistema en un período de estabilización durante 5 días para luego poder comenzar con el muestreo programado (el día 14 de octubre del año 2.003) con sus correspondientes ensayos de laboratorio.

3.6 TOMA DE MUESTRAS

Para el análisis e investigación, el tipo y número de muestras dependen de la importancia del parámetro que se quiera medir, para lo cual se especifica el número de ensayos a realizarse semanalmente en cada uno de los puntos de muestreo señalados más adelante.

3.6.1 Programación. Los análisis de calidad del agua deben realizarse con regularidad, por ejemplo, con frecuencia diaria para los análisis más sencillos como turbiedad, color y sólidos suspendidos, y semanalmente otros parámetros como los análisis bacteriológicos del agua, que exigen equipo y pruebas más costosas.

NOTA: la programación anterior se realizó teniendo en cuenta que solamente se pretende definir, **preliminarmente**, la eficiencia del conjunto (sistema), para que los resultados reflejen logros y deficiencias cometidas durante esta primera etapa de la investigación en cuanto a la construcción del filtro piloto, su puesta en marcha, puntos de muestreo, tiempos de estabilización y maduración del sistema y metodología para la realización de los ensayos de laboratorio. Por esta razón no se justifica un análisis estadístico para los mismos, sino para las siguientes etapas de la investigación.

Cuadro 13. Programación para la toma de muestras

Ensayos	No. De ensayos por semana	No. de puntos de muestreo	No. de semanas	No. total de ensayos
Turbiedad	10	4	5	200
Color verdadero	10	4	5	200
Sólidos suspendidos	10	4	5	200
Coliformes fecales	1	2	5	10
Coliformes totales	1	2	5	10

3.6.2 Puntos de muestreo. El enfoque del trabajo de investigación se dirige hacia un protagonista, el geotextil NT – 2.000; sin embargo, se tomaron muestras en cuatro puntos del filtro piloto durante su operación, a saber:

- a la entrada (agua cruda)
- a la salida del FGD_i (entrada al FGA_s)
- al final del FGA_s (inmediatamente antes del geotextil)
- a la salida del sistema (después del geotextil)

De todas maneras se desea definir eficiencias de remoción para cada etapa del sistema de filtración, pero con énfasis en la geomembrana.

3.6.3 Características físicas del agua. Para el proceso de muestreo se utilizaron recipientes plásticos de 500 ml previamente lavados con agua limpia (de grifo), los cuales se rotularon con hora, fecha y punto de muestreo correspondiente. Dichos frascos fueron reutilizados varias veces. El contenido de cada recipiente permitió realizar análisis de turbiedad, color aparente, color verdadero y sólidos suspendidos en cada punto de muestreo. Este proceso se realizó a diario (mañana y tarde, aprovechando los cambios en el estado del tiempo) excluyendo sábados y festivos.

3.6.4 Características microbiológicas del agua. Utilizando frascos de vidrio previamente esterilizados en el laboratorio de la universidad y utilizados inmediatamente, se tomó una muestra a la entrada (agua cruda) y otra a la salida del sistema para poder observar la remoción de coliformes fecales y totales. Dichos frascos fueron rotulados con hora, fecha, temperatura, punto de muestreo y título del trabajo de grado. Este muestreo se comenzó el día 23 de octubre del año 2.003, es decir, 15 días después de la puesta en marcha para permitir un previo proceso de maduración del filtro piloto y así obtener resultados más estables y confiables. Este proceso se realizó una vez por semana (los días jueves).

3.7 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El programa de monitoreo debe cubrir los aspectos cuantitativos y cualitativos. Las medidas del caudal caracterizan las condiciones operacionales del filtro piloto y proporcionan la información cuantitativa; las pruebas de calidad del agua permiten la

evaluación cualitativa del proceso de tratamiento. La operación del filtro requiere el control y ajuste diario del caudal.

Los análisis de calidad del agua que se realizan en el filtro piloto y los resultados que se registran en el libro diario permiten controlar la operación y mantenimiento en el sistema de tratamiento.

3.7.1 Operación del filtro piloto. Con el fin de que la operación del sistema se realice de una manera continua y eficiente, es necesario llevar a cabo un seguimiento periódico con el cual se ejecuten las siguientes actividades:

- Control y ajuste diario del caudal. A la entrada al filtro grueso dinámico (FGDi) se debe suministrar un caudal mayor que el de diseño, generando un caudal de excesos que es eliminado a través de la cámara de excesos (salida) del mismo filtro con el fin de evitar un déficit del mismo; por lo tanto, el caudal de diseño se verificará a la salida del FGDi controlándolo con la válvula de salida, generando pérdida de energía que garantice la velocidad de filtración de diseño en esta unidad y así evitar el escurrimiento no uniforme de agua a través de los lechos de grava.

- Toma de muestras en los siguientes puntos:

- entrada al filtro grueso dinámico (en la válvula de regulación -entrada al sistema-)
- salida del filtro grueso dinámico (antes del recipiente de aforo de caudal y medición de pérdida de energía en FGAs)
- antes y después del geotextil (desmontando los tubos piezométricos de medición de pérdida de energía en el geotextil)

- Por cada una de las muestras obtenidas, se determinará:

- turbiedad
- color real (verdadero)
- sólidos suspendidos
- coliformes fecales
- coliformes totales

- Determinar la pérdida de carga por formación de biopelícula y acumulación de impurezas en la geomembrana. Con ésto se definen los parámetros de limpieza de la geomembrana y de los filtros.

Durante la operación del filtro piloto también fue posible determinar su *período o tiempo de retención* mediante el uso de anilina. Para ésto, se colocó una pequeña cantidad de esta sustancia en la cámara de entrada del FGDi (entrada al sistema); a partir de ese momento se empezó a contabilizar el tiempo hasta que la anilina reapareció en el agua sobrenadante al final del FGAs (agua filtrada). Por lo tanto:

$$T_R = 1 \text{ hora, } 25 \text{ minutos}$$

Figura 6. Filtro piloto en funcionamiento



En esta figura se observa el sistema en funcionamiento. Se aprecian los niveles de agua en cada uno de los filtros. Debajo del FGD_i se han instalado unos tubos piezométricos con sus respectivas reglillas que permiten medir las pérdidas de energía en el geotextil.

3.7.2 Mantenimiento del filtro piloto. La aplicación del *mantenimiento programado**, para el filtro piloto, consistió en las siguientes actividades ejecutadas una vez por semana:

- Lavado de las cámaras de entrada y salida de los filtros dinámico y grueso ascendente, además del recipiente aforador y de medición de pérdida de energía a la salida del FGD_i.
- Limpieza de la capa superficial de grava de los FGD_i y FGAs (lavado superficial).
- Limpieza hidráulica o lavado de fondo de los FGD_i y FGAs generando golpes de Ariete a partir de la apertura y cierre rápido de las válvulas de lavado o drenaje (lavado profundo).

Una vez terminado el proceso anterior, se procedió a llenar nuevamente los filtros y se dejó estabilizar el sistema hasta 48 horas (los lavados se llevaron a cabo en los fines de semana).

No fue necesario realizar el desmonte y lavado de la geomembrana, debido a que la pérdida de energía generada por la formación de biopelícula y acumulación de impurezas en la misma no fue representativa (mínima).

* FILTRACIÓN EN Múltiples Etapas : Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Cali : CINARA, 1.999. p.43.

4. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA

Una vez tomadas las muestras se ensayaron inmediatamente en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería para definir algunas características físicas del agua: turbiedad, color aparente, color verdadero y sólidos suspendidos, en cada punto de muestreo. Para esto, se utilizó el turbidímetro marca DRT 1008 HF y el colorímetro electrónico marca HACH DR 700. Para evaluar color, tanto aparente (sin filtrar) como verdadero (filtrado) se aplicó el método 8025 APHA (Platino Cobalto). En el segundo equipo también se evaluó el parámetro sólidos suspendidos mediante el método 8006.

4.2 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA

Una vez tomadas las muestras se llevaron inmediatamente al laboratorio de química de la universidad para definir los contenidos y remoción de coliformes fecales y totales a la entrada y salida del sistema. Para esto, fue necesario contar con los servicios de personal y equipo especializados para generar cultivos de estos microorganismos (resultados expresados en UFC: Unidades Formadoras de Colonia).

A continuación se presenta el registro y el análisis de los resultados de esta primera etapa del proyecto de investigación.

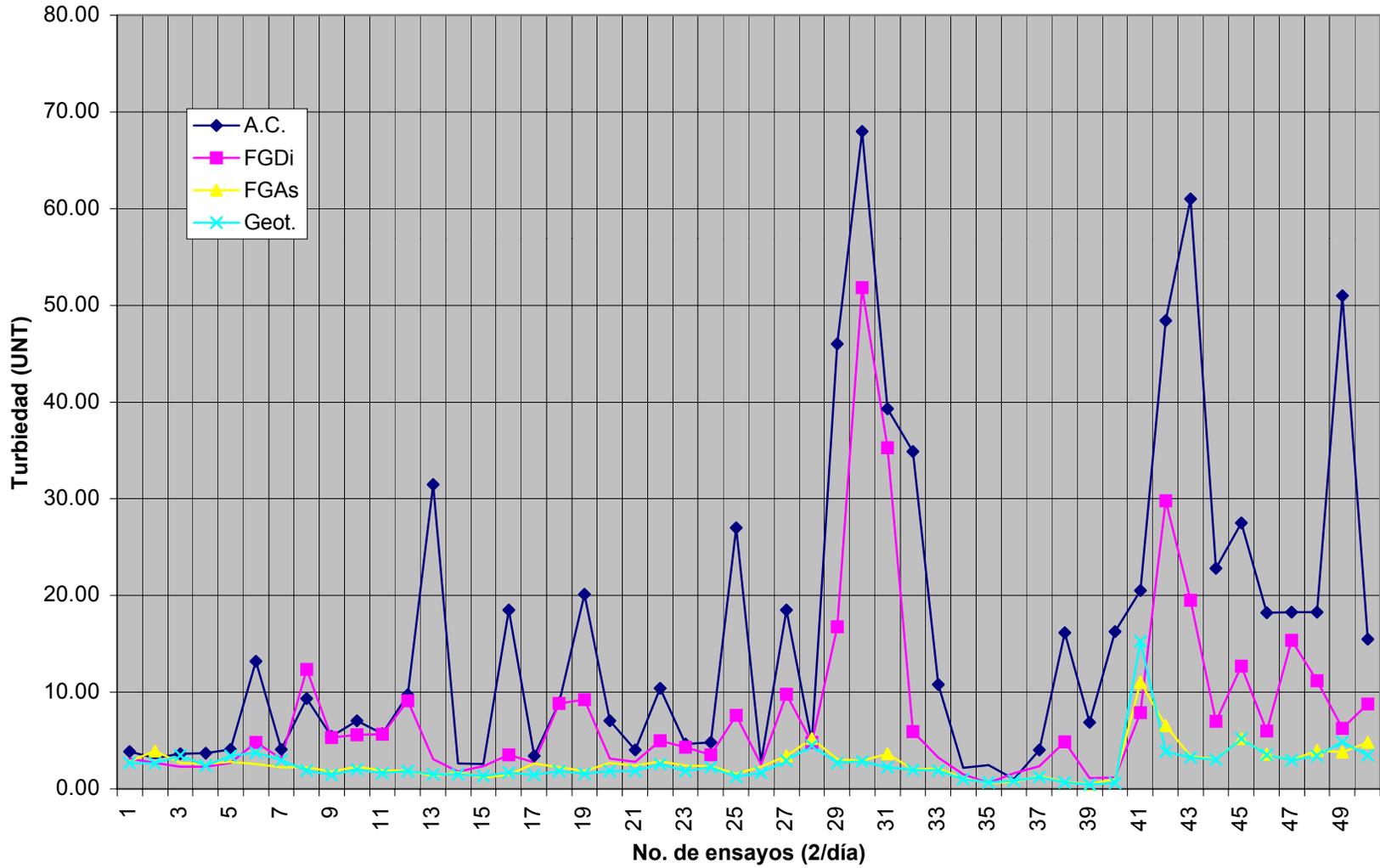
Cuadro 14. Valores de turbiedad y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema

Fecha	Hora	Agua cruda	FGDi		FG As		Geotextil		% total remoción
		UNT	UNT	% remoción	UNT	% remoción	UNT	% remoción	
Oct. 14	10:00 a.m.	3.85	3.15	18.18	2.85	9.52	2.70	5.26	29.87
Oct. 14	5:00 p.m.	3.20	2.70	15.63	3.90	-44.44	2.60	33.33	18.75
Oct. 15	11:00 a.m.	3.66	2.30	37.16	2.67	-16.09	3.48	-30.34	4.92
Oct. 15	6:00 p.m.	3.71	2.28	38.54	2.56	-12.28	2.41	5.86	35.04
Oct. 16	9:00 a.m.	4.10	2.70	34.15	2.80	-3.70	3.40	-21.43	17.07
Oct. 16	4:00 p.m.	13.20	4.80	63.64	2.58	46.25	3.75	-45.35	71.59
Oct. 17	11:00 a.m.	4.07	3.15	22.60	2.23	29.21	2.95	-32.29	27.52
Oct. 17	6:00 p.m.	9.35	12.35	-32.09	2.24	81.86	1.90	15.18	79.68
Oct. 20	9:00 a.m.	5.40	5.30	1.85	1.80	66.04	1.43	20.56	73.52
Oct. 20	4:00 p.m.	7.02	5.60	20.23	2.30	58.93	2.00	13.04	71.51
Oct. 21	9:00 a.m.	5.70	5.65	0.88	1.89	66.55	1.63	13.76	71.40
Oct. 21	4:00 p.m.	9.70	9.10	6.19	1.88	79.34	1.83	2.66	81.13
Oct. 22	7:00 a.m.	31.50	3.10	90.16	1.35	56.45	1.50	-11.11	95.24
Oct. 22	2:00 p.m.	2.61	1.81	30.65	1.75	3.31	1.52	13.14	41.76
Oct. 23	7:00 a.m.	2.57	2.35	8.56	1.17	50.21	1.34	-14.53	47.86
Oct. 23	2:00 p.m.	18.50	3.52	80.97	1.48	57.95	1.70	-14.86	90.81
Oct. 24	10:00 a.m.	3.43	2.75	19.83	2.61	5.09	1.45	44.44	57.73
Oct. 24	5:00 p.m.	8.90	8.85	0.56	2.26	74.46	1.87	17.26	78.99
Oct. 27	9:00 a.m.	20.10	9.20	54.23	1.86	79.78	1.57	15.59	92.19
Oct. 27	4:00 p.m.	7.04	3.15	55.26	2.71	13.97	1.85	31.73	73.72
Oct. 28	8:00 a.m.	4.00	2.80	30.00	2.40	14.29	1.85	22.92	53.75
Oct. 28	4:00 p.m.	10.40	5.00	51.92	2.85	43.00	2.55	10.53	75.48
Oct. 29	10:00 a.m.	4.65	4.30	7.53	2.40	44.19	1.84	23.33	60.43
Oct. 29	5:00 p.m.	4.80	3.50	27.08	2.33	33.43	2.22	4.72	53.75
Oct. 30	8:00 a.m.	27.00	7.60	71.85	1.55	79.61	1.25	19.35	95.37
Oct. 30	3:00 p.m.	2.75	2.50	9.09	2.30	8.00	1.70	26.09	38.18
Oct. 31	8:00 a.m.	18.50	9.80	47.03	3.40	65.31	2.88	15.29	84.43

Oct. 31	3:00 p.m.	4.85	4.80	1.03	5.20	-8.33	4.50	13.46	7.22
Nov. 4	10:00 a.m.	46.00	16.75	63.59	3.10	81.49	2.70	12.90	94.13
Nov. 4	5:00 p.m.	68.00	51.80	23.82	2.90	94.40	2.85	1.72	95.81
Nov. 5	7:00 a.m.	39.30	35.30	10.18	3.65	89.66	2.25	38.36	94.27
Nov. 5	5:00 p.m.	34.90	5.95	82.95	2.02	66.05	1.94	3.96	94.44
Nov. 6	10:00 a.m.	10.80	3.25	69.91	2.15	33.85	1.92	10.70	82.22
Nov. 6	5:00 p.m.	2.20	1.50	31.82	1.10	26.67	1.00	9.09	54.55
Nov. 7	7:00 a.m.	2.46	0.60	75.61	0.59	1.67	0.68	-15.25	72.36
Nov. 7	3:00 p.m.	1.00	1.60	-60.00	0.75	53.13	0.85	-13.33	15.00
Nov. 10	7:00 a.m.	4.00	2.33	41.75	1.34	42.49	1.25	6.72	68.75
Nov. 10	4:00 p.m.	16.15	4.85	69.97	0.73	84.95	0.65	10.96	95.98
Nov. 11	10:00 a.m.	6.85	1.10	83.94	0.51	53.64	0.44	13.73	93.58
Nov. 11	5:00 p.m.	16.25	1.18	92.74	1.03	12.71	0.63	38.83	96.12
Nov. 12	11:00 a.m.	20.50	7.90	61.46	11.00	-39.24	15.28	-38.91	25.46
Nov. 12	5:00 p.m.	48.40	29.80	38.43	6.55	78.02	3.88	40.76	91.98
Nov. 13	7:00 a.m.	61.00	19.50	68.03	3.36	82.77	3.25	3.27	94.67
Nov. 13	4:00 p.m.	22.80	7.00	69.30	3.07	56.14	3.04	0.98	86.67
Nov. 14	7:00 a.m.	27.50	12.70	53.82	5.20	59.06	5.18	0.38	81.16
Nov. 14	6:00 p.m.	18.20	6.00	67.03	3.60	40.00	3.50	2.78	80.77
Nov. 18	10:00 a.m.	18.30	15.35	16.12	2.98	80.59	2.95	1.01	83.88
Nov. 18	5:00 p.m.	18.30	11.20	38.80	3.95	64.73	3.40	13.92	81.42
Nov. 19	7:00 a.m.	51.00	6.25	87.75	3.80	39.20	4.87	-28.16	90.45
Nov. 19	4:00 p.m.	15.50	8.80	43.23	4.80	45.45	3.45	28.13	77.74
Promedios -> Octubre y noviembre		A.C. (UNT) 15.88	FGDi (UNT) 7.70	(%) 38.86	FGAs (UNT) 2.71	(%) 42.59	Geot. (UNT) 2.55	(%) 6.80	(%) 67.61
Noviembre		24.97	11.40	51.37	3.10	52.16	3.00	6.48	79.61

UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad

Figura 7. Variación de turbiedad por etapa del sistema



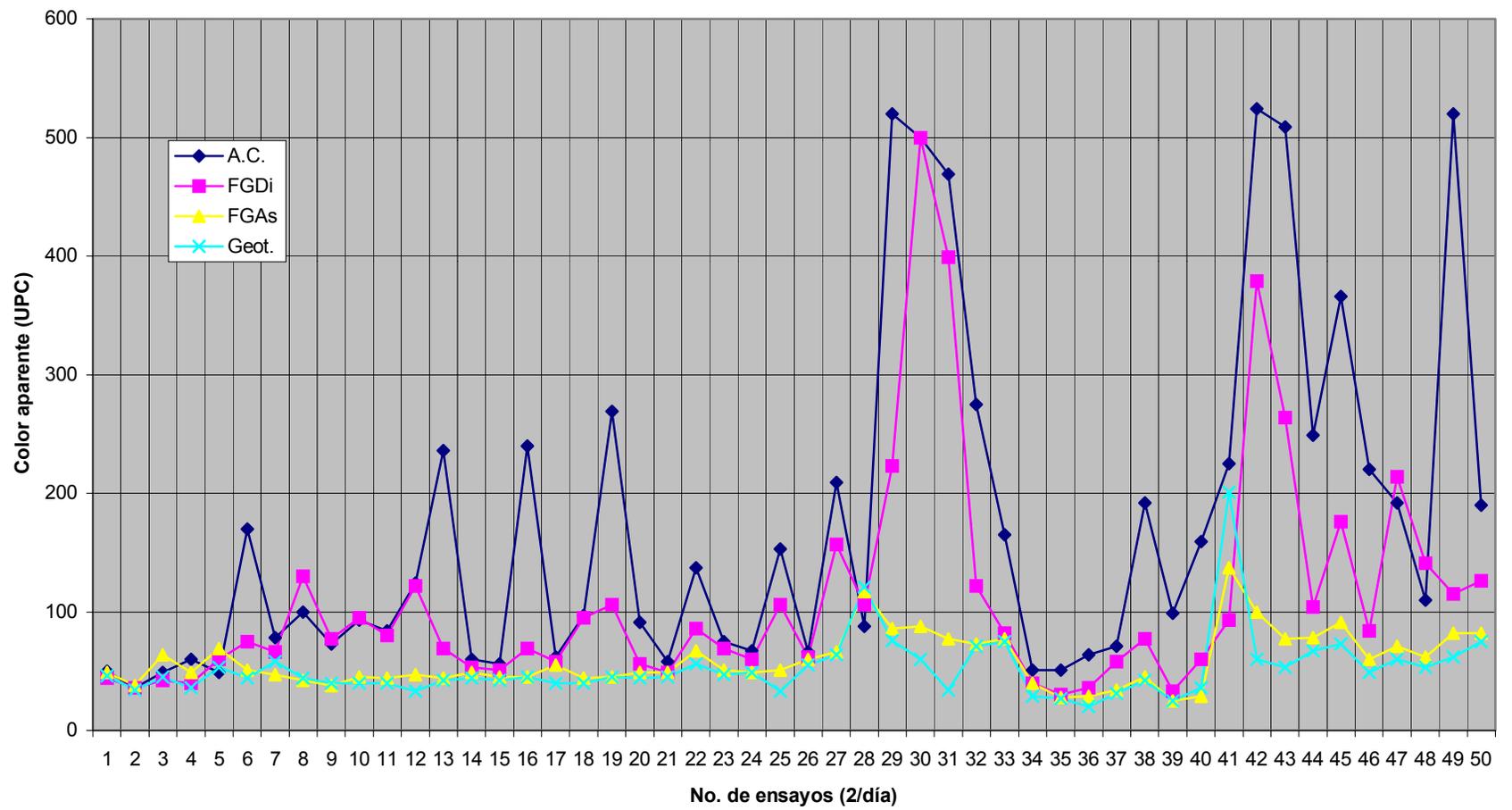
Cuadro 15. Valores de color aparente y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema

Fecha	Hora	Agua cruda	FGDi		FG As		Geotextil		% total remoción
		UPC	UPC	% remoción	UPC	% remoción	UPC	% remoción	
Oct. 14	10:00 a.m.	50	44	12.00	49	-11.36	46	6.12	8.00
Oct. 14	5:00 p.m.	36	36	0.00	38	-5.56	34	10.53	5.56
Oct. 15	11:00 a.m.	49	42	14.29	64	-52.38	45	29.69	8.16
Oct. 15	6:00 p.m.	60	40	33.33	49	-22.50	36	26.53	40.00
Oct. 16	9:00 a.m.	49	60	-22.45	69	-15.00	53	23.19	-8.16
Oct. 16	4:00 p.m.	170	75	55.88	51	32.00	44	13.73	74.12
Oct. 17	11:00 a.m.	78	66	15.38	47	28.79	58	-23.40	25.64
Oct. 17	6:00 p.m.	100	130	-30.00	42	67.69	44	-4.76	56.00
Oct. 20	9:00 a.m.	73	77	-5.48	38	50.65	40	-5.26	45.21
Oct. 20	4:00 p.m.	93	95	-2.15	45	52.63	40	11.11	56.99
Oct. 21	9:00 a.m.	84	80	4.76	44	45.00	40	9.09	52.38
Oct. 21	4:00 p.m.	124	122	1.61	47	61.48	33	29.79	73.39
Oct. 22	7:00 a.m.	236	69	70.76	44	36.23	42	4.55	82.20
Oct. 22	2:00 p.m.	60	53	11.67	49	7.55	44	10.20	26.67
Oct. 23	7:00 a.m.	56	51	8.93	45	11.76	42	6.67	25.00
Oct. 23	2:00 p.m.	240	69	71.25	45	34.78	45	0.00	81.25
Oct. 24	10:00 a.m.	62	58	6.45	55	5.17	40	27.27	35.48
Oct. 24	5:00 p.m.	97	95	2.06	44	53.68	40	9.09	58.76
Oct. 27	9:00 a.m.	269	106	60.59	45	57.55	45	0.00	83.27
Oct. 27	4:00 p.m.	91	56	38.46	49	12.50	44	10.20	51.65
Oct. 28	8:00 a.m.	58	49	15.52	49	0.00	45	8.16	22.41
Oct. 28	4:00 p.m.	137	86	37.23	67	22.09	56	16.42	59.12
Oct. 29	10:00 a.m.	75	69	8.00	51	26.09	47	7.84	37.33
Oct. 29	5:00 p.m.	67	60	10.45	49	18.33	49	0.00	26.87
Oct. 30	8:00 a.m.	153	106	30.72	51	51.89	33	35.29	78.43
Oct. 30	3:00 p.m.	66	62	6.06	60	3.23	55	8.33	16.67
Oct. 31	8:00 a.m.	209	157	24.88	66	57.96	64	3.03	69.38

Oct. 31	3:00 p.m.	88	106	-20.45	117	-10.38	121	-3.42	-37.50
Nov. 4	10:00 a.m.	520	223	57.12	86	61.43	76	11.63	85.38
Nov. 4	5:00 p.m.	500	500	0.00	88	82.40	60	31.82	88.00
Nov. 5	7:00 a.m.	469	399	14.93	77	80.70	34	55.84	92.75
Nov. 5	5:00 p.m.	275	122	55.64	73	40.16	71	2.74	74.18
Nov. 6	10:00 a.m.	165	82	50.30	77	6.10	75	2.60	54.55
Nov. 6	5:00 p.m.	51	40	21.57	40	0.00	29	27.50	43.14
Nov. 7	7:00 a.m.	51	30	41.18	28	6.67	27	3.57	47.06
Nov. 7	3:00 p.m.	64	36	43.75	29	19.44	20	31.03	68.75
Nov. 10	7:00 a.m.	71	58	18.31	34	41.38	31	8.82	56.34
Nov. 10	4:00 p.m.	192	77	59.90	45	41.56	42	6.67	78.13
Nov. 11	10:00 a.m.	99	33	66.67	25	24.24	25	0.00	74.75
Nov. 11	5:00 p.m.	159	60	62.26	29	51.67	36	-24.14	77.36
Nov. 12	11:00 a.m.	225	93	58.67	137	-47.31	201	-46.72	10.67
Nov. 12	5:00 p.m.	524	379	27.67	100	73.61	60	40.00	88.55
Nov. 13	7:00 a.m.	509	264	48.13	77	70.83	53	31.17	89.59
Nov. 13	4:00 p.m.	249	104	58.23	78	25.00	67	14.10	73.09
Nov. 14	7:00 a.m.	366	176	51.91	91	48.30	73	19.78	80.05
Nov. 14	6:00 p.m.	220	84	61.82	60	28.57	49	18.33	77.73
Nov. 18	10:00 a.m.	192	214	-11.46	71	66.82	60	15.49	68.75
Nov. 18	5:00 p.m.	110	141	-28.18	62	56.03	53	14.52	51.82
Nov. 19	7:00 a.m.	520	115	77.88	82	28.70	62	24.39	88.08
Nov. 19	4:00 p.m.	190	126	33.68	82	34.92	75	8.54	60.53
Promedios -> Octubre y noviembre		A.C. (UPC) 173.02	FGDi (UPC) 109.50	(%) 26.59	FGAs (UPC) 58.80	(%) 29.22	Geot. (UPC) 52.08	(%) 11.35	(%) 53.67
Noviembre		260.05	152.55	39.54	66.86	38.24	58.14	13.53	69.51

UPC : Unidades de Platino Cobalto

Figura 8. Variación de color aparente por etapa del sistema



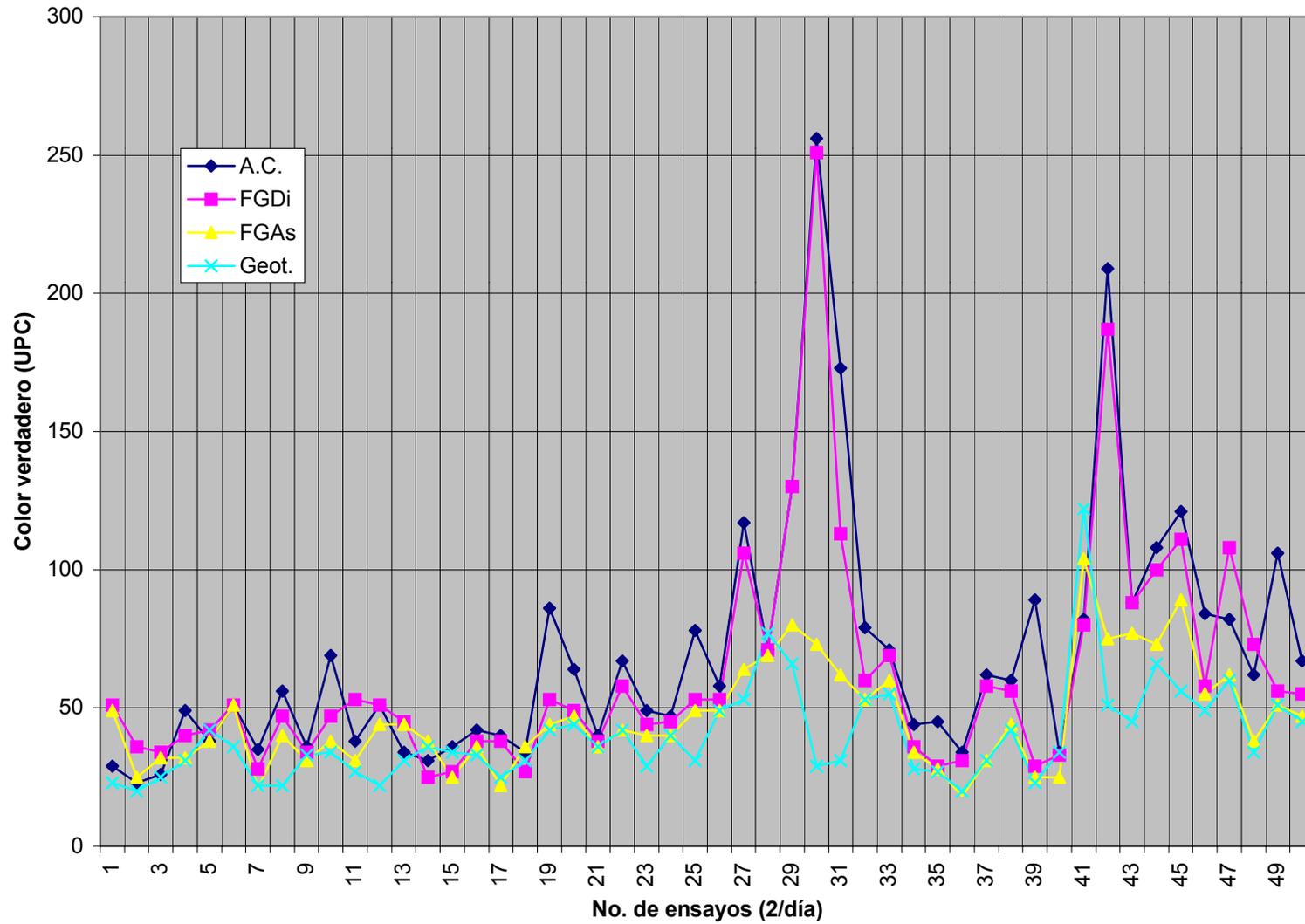
Cuadro 16. Valores de color verdadero y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema

Fecha	Hora	Agua cruda	FGDi		FG As		Geotextil		% total remoción
		UPC	UPC	% remoción	UPC	% remoción	UPC	% remoción	
Oct. 14	10:00 a.m.	29	51	-75.86	49	3.92	23	53.06	20.69
Oct. 14	5:00 p.m.	23	36	-56.52	25	30.56	20	20.00	13.04
Oct. 15	11:00 a.m.	26	34	-30.77	32	5.88	25	21.88	3.85
Oct. 15	6:00 p.m.	49	40	18.37	32	20.00	31	3.13	36.73
Oct. 16	9:00 a.m.	38	42	-10.53	38	9.52	42	-10.53	-10.53
Oct. 16	4:00 p.m.	51	51	0.00	51	0.00	36	29.41	29.41
Oct. 17	11:00 a.m.	35	28	20.00	21	25.00	22	-4.76	37.14
Oct. 17	6:00 p.m.	56	47	16.07	40	14.89	22	45.00	60.71
Oct. 20	9:00 a.m.	36	34	5.56	31	8.82	33	-6.45	8.33
Oct. 20	4:00 p.m.	69	47	31.88	38	19.15	34	10.53	50.72
Oct. 21	9:00 a.m.	38	53	-39.47	31	41.51	27	12.90	28.95
Oct. 21	4:00 p.m.	51	51	0.00	44	13.73	22	50.00	56.86
Oct. 22	7:00 a.m.	34	45	-32.35	44	2.22	31	29.55	8.82
Oct. 22	2:00 p.m.	31	25	19.35	38	-52.00	36	5.26	-16.13
Oct. 23	7:00 a.m.	36	27	25.00	25	7.41	34	-36.00	5.56
Oct. 23	2:00 p.m.	42	38	9.52	36	5.26	33	8.33	21.43
Oct. 24	10:00 a.m.	40	38	5.00	22	42.11	25	-13.64	37.50
Oct. 24	5:00 p.m.	34	27	20.59	36	-33.33	31	13.89	8.82
Oct. 27	9:00 a.m.	86	53	38.37	44	16.98	42	4.55	51.16
Oct. 27	4:00 p.m.	64	49	23.44	47	4.08	44	6.38	31.25
Oct. 28	8:00 a.m.	40	38	5.00	36	5.26	36	0.00	10.00
Oct. 28	4:00 p.m.	67	58	13.43	42	27.59	42	0.00	37.31
Oct. 29	10:00 a.m.	49	44	10.20	40	9.09	29	27.50	40.82
Oct. 29	5:00 p.m.	47	45	4.26	40	11.11	40	0.00	14.89
Oct. 30	8:00 a.m.	78	53	32.05	49	7.55	31	36.73	60.26
Oct. 30	3:00 p.m.	58	53	8.62	49	7.55	49	0.00	15.52
Oct. 31	8:00 a.m.	117	106	9.40	64	39.62	53	17.19	54.70

Oct. 31	3:00 p.m.	71	71	0.00	69	2.82	77	-11.59	-8.45
Nov. 4	10:00 a.m.	130	130	0.00	80	38.46	66	17.50	49.23
Nov. 4	5:00 p.m.	256	251	1.95	73	70.92	29	60.27	88.67
Nov. 5	7:00 a.m.	173	113	34.68	62	45.13	31	50.00	82.08
Nov. 5	5:00 p.m.	79	60	24.05	53	11.67	53	0.00	32.91
Nov. 6	10:00 a.m.	71	69	2.82	60	13.04	55	8.33	22.54
Nov. 6	5:00 p.m.	44	36	18.18	34	5.56	28	17.65	36.36
Nov. 7	7:00 a.m.	45	29	35.56	28	3.45	27	3.57	40.00
Nov. 7	3:00 p.m.	34	31	8.82	18	41.94	20	-11.11	41.18
Nov. 10	7:00 a.m.	62	58	6.45	31	46.55	31	0.00	50.00
Nov. 10	4:00 p.m.	60	56	6.67	44	21.43	42	4.55	30.00
Nov. 11	10:00 a.m.	89	29	67.42	25	13.79	23	8.00	74.16
Nov. 11	5:00 p.m.	34	33	2.94	25	24.24	34	-36.00	0.00
Nov. 12	11:00 a.m.	82	80	2.44	104	-30.00	122	-17.31	-48.78
Nov. 12	5:00 p.m.	209	187	10.53	75	59.89	51	32.00	75.60
Nov. 13	7:00 a.m.	88	88	0.00	77	12.50	45	41.56	48.86
Nov. 13	4:00 p.m.	108	100	7.41	73	27.00	66	9.59	38.89
Nov. 14	7:00 a.m.	121	111	8.26	89	19.82	56	37.08	53.72
Nov. 14	6:00 p.m.	84	58	30.95	55	5.17	49	10.91	41.67
Nov. 18	10:00 a.m.	82	108	-31.71	62	42.59	60	3.23	26.83
Nov. 18	5:00 p.m.	62	73	-17.74	38	47.95	34	10.53	45.16
Nov. 19	7:00 a.m.	106	56	47.17	51	8.93	51	0.00	51.89
Nov. 19	4:00 p.m.	67	55	17.91	47	14.55	45	4.26	32.84
Promedios -> Octubre y noviembre		A.C. (UPC) 69.62	FGDi (UPC) 61.90	(%) 7.11	FGAs (UPC) 46.34	(%) 16.82	Geot. (UPC) 39.76	(%) 11.34	(%) 32.46
Noviembre		94.82	82.32	12.94	54.73	24.75	46.27	11.57	41.54

UPC : Unidades de Platino Cobalto

Figura 9. Variación de color verdadero por etapa del sistema

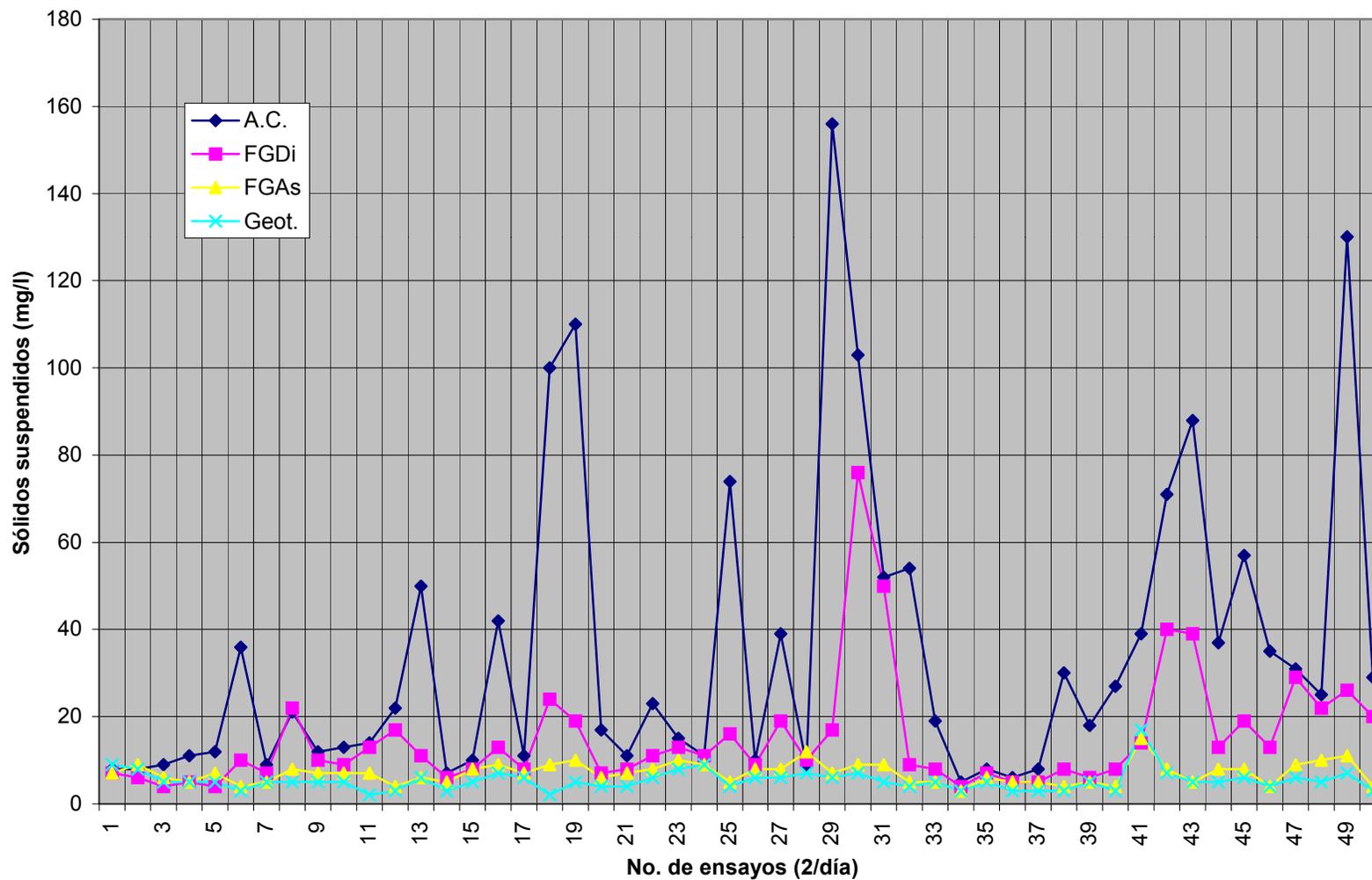


Cuadro 17. Valores de sólidos suspendidos y porcentajes de remoción por cada etapa del sistema

Fecha	Hora	Agua cruda	FGDi		FG As		Geotextil		% total remoción
		mg/l	mg/l	% remoción	mg/l	% remoción	mg/l	% remoción	
Oct. 14	10:00 a.m.	8	7	12.50	7	0.00	9	-28.57	-12.50
Oct. 14	5:00 p.m.	8	6	25.00	9	-50.00	8	11.11	0.00
Oct. 15	11:00 a.m.	9	4	55.56	6	-50.00	5	16.67	44.44
Oct. 15	6:00 p.m.	11	5	54.55	5	0.00	5	0.00	54.55
Oct. 16	9:00 a.m.	12	4	66.67	7	-75.00	5	28.57	58.33
Oct. 16	4:00 p.m.	36	10	72.22	4	60.00	3	25.00	91.67
Oct. 17	11:00 a.m.	9	7	22.22	5	28.57	5	0.00	44.44
Oct. 17	6:00 p.m.	21	22	-4.76	8	63.64	5	37.50	76.19
Oct. 20	9:00 a.m.	12	10	16.67	7	30.00	5	28.57	58.33
Oct. 20	4:00 p.m.	13	9	30.77	7	22.22	5	28.57	61.54
Oct. 21	9:00 a.m.	14	13	7.14	7	46.15	2	71.43	85.71
Oct. 21	4:00 p.m.	22	17	22.73	4	76.47	3	25.00	86.36
Oct. 22	7:00 a.m.	50	11	78.00	6	45.45	6	0.00	88.00
Oct. 22	2:00 p.m.	7	6	14.29	5	16.67	3	40.00	57.14
Oct. 23	7:00 a.m.	10	8	20.00	8	0.00	5	37.50	50.00
Oct. 23	2:00 p.m.	42	13	69.05	9	30.77	7	22.22	83.33
Oct. 24	10:00 a.m.	11	8	27.27	7	12.50	6	14.29	45.45
Oct. 24	5:00 p.m.	100	24	76.00	9	62.50	2	77.78	98.00
Oct. 27	9:00 a.m.	110	19	82.73	10	47.37	5	50.00	95.45
Oct. 27	4:00 p.m.	17	7	58.82	6	14.29	4	33.33	76.47
Oct. 28	8:00 a.m.	11	8	27.27	7	12.50	4	42.86	63.64
Oct. 28	4:00 p.m.	23	11	52.17	8	27.27	6	25.00	73.91
Oct. 29	10:00 a.m.	15	13	13.33	10	23.08	8	20.00	46.67
Oct. 29	5:00 p.m.	11	11	0.00	9	18.18	9	0.00	18.18
Oct. 30	8:00 a.m.	74	16	78.38	5	68.75	4	20.00	94.59
Oct. 30	3:00 p.m.	10	9	10.00	8	11.11	6	25.00	40.00
Oct. 31	8:00 a.m.	39	19	51.28	8	57.89	6	25.00	84.62

Oct. 31	3:00 p.m.	9	10	-11.11	12	-20.00	7	41.67	22.22
Nov. 4	10:00 a.m.	156	17	89.10	7	58.82	6	14.29	96.15
Nov. 4	5:00 p.m.	103	76	26.21	9	88.16	7	22.22	93.20
Nov. 5	7:00 a.m.	52	50	3.85	9	82.00	5	44.44	90.38
Nov. 5	5:00 p.m.	54	9	83.33	5	44.44	4	20.00	92.59
Nov. 6	10:00 a.m.	19	8	57.89	5	37.50	5	0.00	73.68
Nov. 6	5:00 p.m.	5	4	20.00	3	25.00	3	0.00	40.00
Nov. 7	7:00 a.m.	8	7	12.50	6	14.29	5	16.67	37.50
Nov. 7	3:00 p.m.	6	5	16.67	5	0.00	3	40.00	50.00
Nov. 10	7:00 a.m.	8	5	37.50	5	0.00	3	40.00	62.50
Nov. 10	4:00 p.m.	30	8	73.33	4	50.00	3	25.00	90.00
Nov. 11	10:00 a.m.	18	6	66.67	5	16.67	5	0.00	72.22
Nov. 11	5:00 p.m.	27	8	70.37	4	50.00	3	25.00	88.89
Nov. 12	11:00 a.m.	39	14	64.10	15	-7.14	17	-13.33	56.41
Nov. 12	5:00 p.m.	71	40	43.66	8	80.00	7	12.50	90.14
Nov. 13	7:00 a.m.	88	39	55.68	5	87.18	5	0.00	94.32
Nov. 13	4:00 p.m.	37	13	64.86	8	38.46	5	37.50	86.49
Nov. 14	7:00 a.m.	57	19	66.67	8	57.89	6	25.00	89.47
Nov. 14	6:00 p.m.	35	13	62.86	4	69.23	4	0.00	88.57
Nov. 18	10:00 a.m.	31	29	6.45	9	68.97	6	33.33	80.65
Nov. 18	5:00 p.m.	25	22	12.00	10	54.55	5	50.00	80.00
Nov. 19	7:00 a.m.	130	26	80.00	11	57.69	7	36.36	94.62
Nov. 19	4:00 p.m.	29	20	31.03	4	80.00	3	25.00	89.66
Promedios -> Octubre y noviembre		A.C. (mg/l) 34.84	FGDi (mg/l) 14.90	(%) 41.47	FGAs (mg/l) 7.04	(%) 32.68	Geot. (mg/l) 5.30	(%) 23.45	(%) 68.48
Noviembre		46.73	19.91	47.49	6.77	47.90	5.32	20.64	78.97

Figura 10. Variación de sólidos suspendidos por etapa del sistema



Cuadro 18. Valores de coliformes fecales y porcentajes de remoción

Fecha	Agua cruda	Efluente	% remoción
	UFC/100 ml	UFC/100 ml	
Oct. 23	7	2	71.43
Oct. 30	164	84	48.78
Nov. 6	128	98	23.44
Nov. 13	74	68	8.11
Nov. 20	98	62	36.73
Promedios->	94.20	62.80	37.70

Cuadro 19. Valores de coliformes totales y porcentajes de remoción

Fecha	Agua cruda	Efluente	% remoción
	UFC/100 ml	UFC/100 ml	
Oct. 23	28	6	78.57
Oct. 30	128	72	43.75
Nov. 6	420	380	9.52
Nov. 13	210	128	39.05
Nov. 20	204	108	47.06
Promedios->	198.00	138.80	43.59

UFC: Unidades Formadoras de Colonia

Figura 11. Variación de coliformes fecales

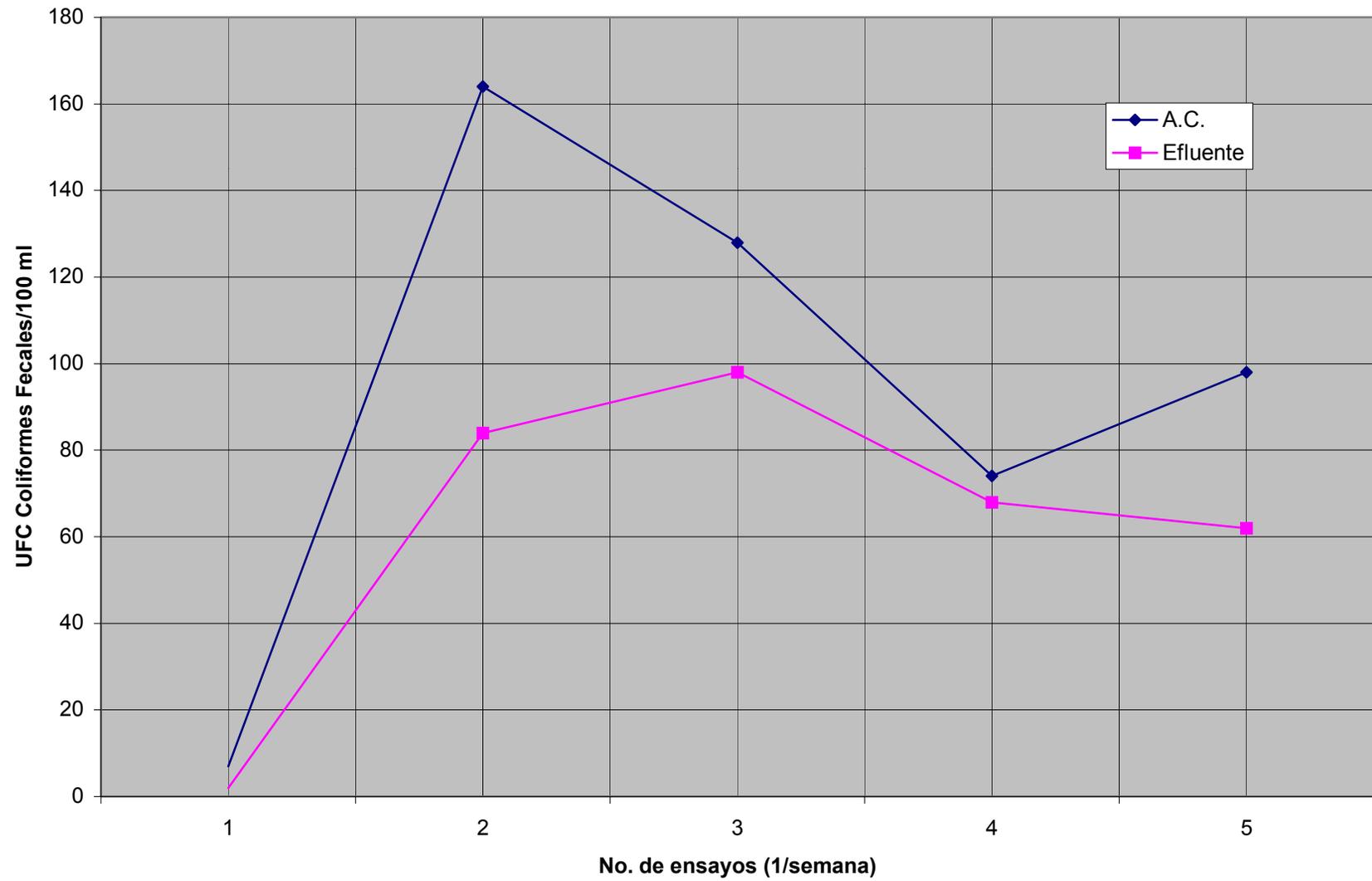
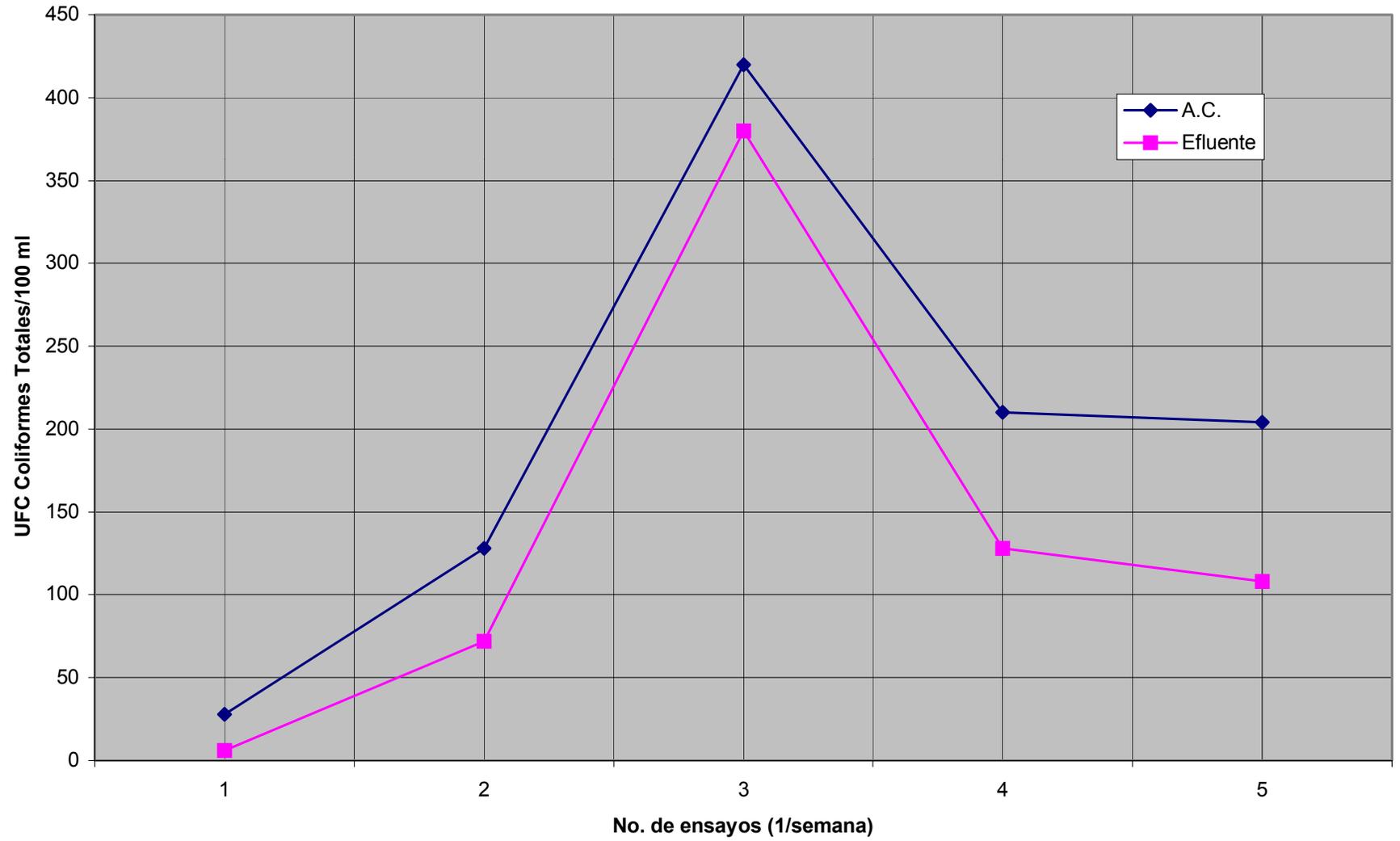


Figura 12. Variación de coliformes totales



4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los cuadros y figuras anteriores se puede analizar lo siguiente:

4.3.1 Turbiedad. A pesar de que antes de la toma de muestras el filtro se dejó en funcionamiento durante 5 días (período de estabilización), los resultados obtenidos inicialmente presentan un cierto grado de incertidumbre, por cuanto a que durante los primeros días de funcionamiento la grava continuó lavándose y, en varias ocasiones, el efluente de una etapa o unidad de filtración presentó mayor turbiedad que el afluente de la misma y, lo anterior, a pesar de que la grava fue muy bien lavada antes de su vertimiento al filtro. Esta situación se refleja para los primeros 10 días de resultados del cuadro 14, lo cual permite concluir que el filtro piloto necesitó un período de estabilización más largo que el previsto al principio, es decir, de por lo menos 15 días o hasta un mes. Después de este tiempo, los resultados son más estables y confiables. Si los porcentajes de remoción (promedio) se analizan sin tener en cuenta los resultados obtenidos durante el período de estabilización, éstos aumentan en cierto grado, lo cual viene a ser una recomendación para las siguientes etapas de la investigación. Haciendo el cálculo para la segunda mitad de los resultados obtenidos (mes de noviembre), el porcentaje total (promedio) de remoción de turbiedad del conjunto pasa del 67,61 % (octubre y noviembre) al 79,61 %; este último valor puede considerarse como un resultado más confiable que el primero, por cuanto a que no se promediaron los resultados del período de estabilización.

Teniendo en cuenta la consideración anterior, para el mes de noviembre la turbiedad promedio de la fuente (a la entrada al filtro) es de 24,97 UNT, la cual está por encima del valor admisible ($T \leq 5$ UNT), mientras que el valor del efluente (a la salida del sistema) es de 3 UNT, cumpliendo con la norma. En general, de los 50 resultados finales (efluente), solamente 2 (el 4 %) no cumplieron con este parámetro, lo cual es satisfactorio para esta primera etapa de la investigación; esos 2 resultados se presentaron en el mes de noviembre.

Observando las remociones por cada etapa del sistema (para noviembre) se concluye que, para este parámetro, el filtro grueso de flujo ascendente es el de mayor eficiencia (remoción del 52,16 %) seguido del filtro grueso dinámico (51,37 %) y la etapa de menor remoción la constituye el geotextil (6,48 %), con una remoción final (promedio del filtro piloto) del 79,61 %.

De las 50 muestras tomadas, 18 cumplen con el parámetro de turbiedad a la entrada al filtro (menores o iguales a 5 UNT), pero se observa que para los valores más altos registrados en el afluente (picos de turbiedad: entre 40 y 68 UNT) el filtro piloto los reduce por debajo de 5 UNT, con porcentajes de remoción total hasta del 95,98 %. Particularmente, en el geotextil, la mayor remoción es de 2,61 a 1,45 UNT (44,44 %).

Se debe tener en cuenta que para la remoción de turbiedad, así como de color y sólidos suspendidos, no es lo mismo remover, por ejemplo, 5 a 4 UNT que 1 a 0 UNT ya que un rango o valor más alto puede removerse con métodos más simples, mientras que para remover pequeñas cantidades de alguno de estos parámetros es mucho más complejo y

puede necesitarse de procesos adicionales. Un caso claro de esta situación se aprecia cuando el agua llega al geotextil con 0,51 UNT y sale con 0,44 UNT, debido a que en las etapas anteriores se ha removido parte considerable de la turbiedad. Se concluye que, en general, el agua que le llega al geotextil posee valores relativamente bajos de estos parámetros, lo cual refleja, aparentemente, que el porcentaje de remoción es más bajo que en las anteriores etapas del proceso de filtración pero que si, por ejemplo, el geotextil se colocara al inicio del filtro, dicho porcentaje se elevaría apreciablemente pero habría mayor saturación del mismo (lo anterior, principalmente, para los parámetros turbiedad y sólidos suspendidos; probablemente no para color). Con esto se quiere resaltar que el geotextil presentaría un buen grado de remoción para altas cargas contaminantes del agua (turbiedad y sólidos suspendidos) pero, de todas maneras, también presenta un grado de remoción aceptable para pequeñas cargas de estos parámetros.

En la figura 7 (variación de turbiedad) se observan algunos picos irregulares de turbiedad para el agua cruda; en las tres etapas del sistema este parámetro sigue esa misma tendencia pero por debajo de la curva de la etapa anterior (respectivamente). En algunos casos las curvas se cruzan entre si, principalmente para el período de estabilización, en que la grava continúa lavándose. Las curvas de turbiedad para el FGAs y el geotextil se encuentran bastante próximas entre si, reflejando una mayor remoción en el primero; lo anterior debido a lo expuesto anteriormente acerca de la variación de las cargas contaminantes en el agua.

4.3.2 Color. Tanto para el color aparente como *verdadero* se observa que los resultados obtenidos inicialmente también presentan un cierto grado de incertidumbre debido a las razones expuestas anteriormente. Esta situación se refleja para los primeros 10 días de resultados de los cuadros 15 y 16, debido a que estos datos corresponden al período de estabilización. Transcurrido dicho período, los resultados son más estables. Tomando la segunda mitad de los resultados obtenidos (mes de noviembre), el porcentaje total (promedio) de remoción de color verdadero del conjunto pasa del 32,46 % (octubre y noviembre) al 41,54 %; este último valor puede considerarse como un resultado más confiable que el primero, por cuanto a que no se promediaron los resultados del período de estabilización.

En cuanto a *color verdadero*, para el mes de noviembre, el promedio de la fuente (a la entrada al filtro) es de 94,82 UPC, el cual está por encima con respecto al valor admisible (C.V. ≤ 15 UPC); lo mismo sucede con el valor del efluente (a la salida del sistema) con 46,27 UPC que incumple, también, la norma. En definitiva, ninguno de los 50 resultados finales (efluente) cumple con la norma en cuanto a este parámetro. Lo anterior ya se había presentado, ya que de acuerdo a la bibliografía revisada, las experiencias con procesos de filtración múltiple aplicando geotextiles muestran que estos sistemas no alcanzan a remover color de manera tal que permitan cumplir con las normas y que, por lo tanto, es necesario realizar variaciones de fondo o aplicar procesos adicionales y que, en general, las remociones de color varían entre el 30 y 40 % (valores bajos). El porcentaje de remoción total obtenido para noviembre (41,54 %) está levemente por encima de este rango, lo cual muestra que el filtro piloto supera al promedio de filtros experimentales en cuanto al este parámetro.

Observando las remociones por cada etapa del sistema (para noviembre) se concluye que, para color verdadero, el filtro grueso de flujo ascendente es el de mayor eficiencia (remoción del 24,75 %) seguido del filtro grueso dinámico (12,94 %) y la etapa de menor remoción la constituye el geotextil (11,57 %), con una remoción final (promedio del filtro piloto) del 41,54 %. Se observa que los porcentajes de remoción del FGD_i y el geotextil están muy próximos (aspecto que no sucede con el parámetro turbiedad), indicando que este último casi alcanza la eficiencia del filtro granular para retener partículas muy pequeñas responsables del color (materia orgánica coloreada, sustancias húmicas, ácidos fúlvicos, metales –hierro y manganeso- y desechos industriales coloreados). Por lo tanto, se concluye que el geotextil se comporta mejor, en cierto grado, para la remoción de color.

De las 50 muestras tomadas, ninguna cumple con el parámetro de color verdadero a la entrada al filtro (menores o iguales a 15 UPC), pero se observa que para los valores más altos registrados en el afluente (picos de color verdadero: entre 130 y 256 UPC) el filtro piloto los reduce a valores entre 29 y 66 UPC, con porcentajes de remoción total hasta del 75 %. Particularmente, en el geotextil, la mayor remoción es de 73 a 29 UPC (60,27 %).

En la figura 9 (variación de color verdadero) se observan algunos picos irregulares de color para el agua cruda; en las tres etapas del sistema este parámetro sigue esa misma tendencia pero por debajo de la curva de la anterior etapa del sistema (respectivamente). En algunos casos las curvas se cruzan entre si, principalmente para el período de estabilización. Las curvas de color v. para cada etapa del sistema no se encuentran muy próximas entre si, reflejando remociones aceptables para los tres casos.

NOTA: es importante anotar que durante el proceso de análisis de las muestras en el laboratorio se utilizó el colorímetro electrónico; algunos resultados arrojados por este dispositivo fueron comparados con los obtenidos a través de métodos tradicionales (método comparativo o utilizando el espectrofotómetro), concluyendo que los valores del equipo electrónico daban, aproximadamente, un 40 % más altos que los obtenidos tradicionalmente, lo cual dejó en duda el valor real como tal de color (aparente y verdadero). De todas maneras, los porcentajes de remoción no se ven afectados por esta situación, solamente los valores numéricos en UPC. Esta situación se debió por la falta de una mejor limpieza de las celdas de vidrio utilizadas con el colorímetro electrónico por parte del operario del laboratorio. Infortunadamente, se cayó en cuenta de esta situación finalizando la etapa de muestreo, por lo que no fue posible corregirla.

4.3.3 Sólidos suspendidos. Atendiendo las consideraciones anotadas para los parámetros de turbiedad y color, se toma la segunda mitad de los resultados obtenidos (mes de noviembre) a partir de los cuales el porcentaje total (promedio) de remoción de sólidos suspendidos del conjunto pasa del 68,48 % (octubre y noviembre) al 78,97 %; este último valor puede considerarse como un resultado más confiable que el primero, por cuanto a que no se promediaron los resultados del período de estabilización.

Para el mes de noviembre, el promedio de la fuente (a la entrada al filtro) es de 46,73 mg/l, el cual está por encima del valor recomendado¹⁴ (S.S. < 5 mg/l); el valor del efluente (a la salida del sistema) es de 5,32 mg/l, acercándose bastante a la recomendación pero sin llegar a satisfacerla. En definitiva, de 50 resultados finales (efluente), 16 satisfacen la recomendación en cuanto a este parámetro (el 32 % de los resultados) y, para noviembre, solo 8.

Observando las remociones por cada etapa del sistema (para noviembre) se concluye que, para sólidos suspendidos, el filtro grueso de flujo ascendente es el de mayor eficiencia (remoción del 47,90 %) seguido del filtro grueso dinámico (47,49 %) y la etapa de menor remoción la constituye el geotextil (20,64 %), con una remoción final (promedio del filtro piloto) del 78,97 %. En este caso, el geotextil presentó la menor eficiencia, tal como sucedió con la remoción de turbiedad y color.

De las 50 muestras tomadas, ninguna satisface la recomendación para sólidos suspendidos a la entrada al filtro (menores a 5 mg/l), pero se observa que para los valores más altos registrados en el afluente (picos de sólidos suspendidos: entre 110 y 156 mg/l) el filtro piloto los reduce a valores entre 2 y 7 mg/l, con porcentajes de remoción total hasta del 98 %. Particularmente, en el geotextil, la mayor remoción es de 9 a 2 mg/l (77,78 %).

En la figura 10 (variación de sólidos suspendidos) se observan algunos picos irregulares de S.S. para el agua cruda; en las tres etapas del sistema este parámetro sigue esa misma tendencia pero por debajo de la curva de la anterior etapa del sistema (respectivamente). En algunos casos las curvas se cruzan entre si (período de estabilización) y reflejan remociones aceptables, pero la de mayor remoción corresponde a la del FGAs.

4.3.4 Coliformes (fecales y totales). La toma de muestras para coliformes se realizó 15 días después de iniciado el muestreo para los demás parámetros, es decir, 20 días después de la puesta en marcha; por lo tanto, se dio un tiempo de estabilización un poco mayor respecto a los demás parámetros y un cierto grado de maduración del filtro. Para coliformes no se obtuvieron muestras por cada etapa del sistema; solamente para el afluente y efluente del mismo.

En cuanto a *coliformes fecales*, el promedio de la fuente (a la entrada al filtro) es de 94,20 UFC/100 ml, el cual está muy por encima del valor especificado por la norma (C.F. = 0 UFC/100 ml) y, el valor del efluente (a la salida del sistema), es de 62,80 UFC/100ml, incumpliendo, también, la norma. En definitiva, ninguno de los 5 resultados finales cumple ni se acerca a la especificación de la norma.

Para *coliformes totales*, el promedio de la fuente (a la entrada al filtro) es de 198 UFC/100 ml y el valor del efluente (a la salida del sistema) es de 138,80 UFC/100ml, los cuales están muy por encima del valor especificado por la norma (C.T. = 0 UFC/100 ml) (no la cumplen).

¹⁴ WEGELIN et al. Experiencias con filtros a escala piloto. 1.986.

Se observa que para los valores más altos registrados en el afluente (picos de coliformes fecales) de 128 y 164 UFC/100 ml, el filtro piloto los reduce a 98 y 84 UFC/100 ml, respectivamente, con porcentajes de remoción total hasta del 71,43 %; para coliformes totales, se tienen picos en el afluente de 210 y 420 UFC/100 ml con reducciones, por parte del filtro piloto, a 128 y 380 UFC/100 ml, respectivamente, con porcentajes de remoción total hasta del 78,57 %. Estos resultados se obtuvieron con temperaturas entre 14 y 22° C, prevaleciendo, en la mayoría de los casos, una temperatura de 17° C.

En las figuras 11 y 12 (variación de coliformes fecales y totales, respectivamente) se observan picos de estos parámetros para el agua cruda; tanto en el afluente como en el efluente las curvas siguen una misma tendencia pero la primera por encima de la otra, respectivamente. Las curvas no se cruzan entre si, por lo que hubo un mayor período para estabilización del sistema. Para coliformes fecales estas curvas reflejan remociones variables durante el período de muestreo; caso contrario se observa con las de coliformes totales, en que las remociones fueron más estables (curvas paralelas).

NOTA: se debe anotar que para la remoción total de coliformes (fecales y totales) generalmente se contará con la aplicación de un proceso adicional al pretratamiento, consistente en la desinfección con cloro.

5. CONCLUSIONES

- El presente trabajo de grado, que corresponde al desarrollo de la primera etapa del proyecto de investigación: filtración múltiple con geomembranas, se constituye en el más importante paso de avance del mismo, a través del cual se deja la base o herramienta fundamental del estudio, que se constituye en el filtro piloto. Por lo tanto, para esta I etapa únicamente se va a dejar en funcionamiento el sistema dando a conocer unos resultados preliminares de eficiencias para algunos parámetros de calidad del agua; para las siguientes etapas se realizarán variaciones en el sistema y nuevos ensayos que, a partir del análisis más minucioso, se obtendrán resultados comparables con los obtenidos en otras investigaciones y los parámetros contenidos en la norma RAS - 2.000.
- Así como el filtro piloto, todo sistema de filtración requiere un proceso o período de estabilización y maduración, ya que aunque se haya realizado un proceso previo de lavado de la grava, ésta continúa desprendiendo impurezas que inicialmente afectan las características del agua que circula a través del filtro, variando las características de entrada del agua cruda. Además, es de gran importancia en los resultados finales, tanto físicos como microbiológicos, la formación de la biopelícula en la superficie del geotextil (maduración del filtro), por cuanto a que ésta participa, también, en la retención de partículas, impurezas, etc. que afectan las características del agua filtrada.
- Tanto para la remoción de turbiedad, color y sólidos suspendidos, no es lo mismo remover, por ejemplo, 5 a 4 UNT que 1 a 0 UNT ya que un mayor rango y/o valor puede removerse más fácil, rápido y directamente que al tener pequeñas cantidades o valores de alguno de estos parámetros. Esto sucede, principalmente, en el paso del agua a través del geotextil, porque en las etapas anteriores se ha removido parte considerable de la carga contaminante, quedando, esta última etapa con valores relativamente bajos, lo cual refleja, aparentemente, que el porcentaje de remoción es más bajo con respecto a las etapas previas.
- Nunca puede pasarse por alto el proceso de mantenimiento del sistema de filtración, ya que mediante éste se controla la acumulación de impurezas y lodos que generarían variaciones en la velocidad de filtración, pérdidas de energía y hasta el taponamiento del filtro. Es así como se siguió un proceso programado de limpieza del mismo, incluyendo el lavado de cámaras de entrada y salida, lavado de los estratos de gravilla superficiales y lavados de fondo (con apertura de la válvula de lavado), para ambos filtros, porque gran parte del éxito del mejoramiento de la calidad del agua en el sistema depende del correcto y oportuno mantenimiento que preserve el buen estado de los lechos y procure una mayor duración de las carreras de filtración.
- El mejor comportamiento del sistema se logró al remover turbiedad y sólidos suspendidos, alcanzando remociones (promedio) hasta del 79,61 y 78,97 %, respectivamente, sin la utilización de coagulantes o cualquier otro tipo de sustancias químicas. Sin embargo, el sistema presentó baja eficiencia en la remoción de coloides y

sustancias húmicas responsables del color, considerando que el agua cruda presentó un alto contenido de este parámetro (color verdadero: 69,62 UPC) durante el período de muestreo. En general, el filtro grueso de flujo ascendente constituyó la etapa de mayor eficiencia durante el período de muestreo, seguida por el filtro grueso dinámico y, finalmente, el geotextil. Para turbiedad y sólidos suspendidos, las eficiencias del FGD_i y FGAs fueron muy parecidas y, para color, sucedió lo mismo entre el FGD_i y el geotextil.

- La manta sintética (NT – 2.000), bajo las condiciones de operación que se presentaron en la primera etapa de la investigación, no generó gran impacto en el mejoramiento de la calidad del agua. Mejor comportamiento lo tuvieron los filtros gruesos dinámico y de flujo ascendente, especialmente para turbiedad y sólidos suspendidos y, en menor proporción, para color y coliformes. De todas maneras, todas las etapas del sistema contribuyeron en la remoción de los parámetros analizados en el presente trabajo y se podrían alcanzar eficiencias mayores cuando el sistema llegue a un estado más avanzado de maduración (próximas etapas de la investigación).

- Debido al poco tiempo de toma de muestras (5 semanas) no pudo realizarse un seguimiento claro de las pérdidas de energía por acumulación de impurezas y lodos en el filtro y geotextil, ya que dicha pérdida fue mínima (casi inapreciable). De todas formas, hubo un oportuno mantenimiento del sistema que evitó pérdidas de energía evidentes y colmataciones prematuras.

- Mediante el desarrollo del presente trabajo de grado se cumplió con uno de los propósitos planteados al comenzar la investigación, referente a que el filtro piloto también sirva como medio pedagógico que permita la observación del funcionamiento de un sistema de filtración múltiple granular con geomembrana, en el laboratorio del Hidráulica de la Facultad de Ingeniería.

- El compartir conocimientos con nuestro director de trabajo de grado nos ha permitido madurar conceptos sobre diferentes campos tanto en la Ingeniería Civil como en áreas más específicas referentes a plantas de tratamiento para potabilización del agua como en el campo de la Ingeniería Ambiental.

- El proceso de muestreo y obtención de resultados preliminares con el filtro piloto permitieron formular una serie de recomendaciones que serán de gran utilidad para los grupos que continúen con las siguientes etapas del proyecto de investigación, debido a que ayudaron a detectar algunas fallas metodológicas durante la puesta en marcha del sistema y, además, a proponer nuevas alternativas o variantes que muy probablemente mejorarán la eficiencia del todo el conjunto.

RECOMENDACIONES

- Para continuar con la segunda etapa del proyecto de investigación, el filtro piloto se debe vaciar y lavar, así como también la grava, además de un nuevo proceso de tamizado; por lo tanto, es necesario volverlo a armar y ponerlo nuevamente en marcha. Por esta razón, se recomienda que éste debe tener un período de estabilización más largo que el considerado en la primera etapa. Lo mejor sería tomar muestras después de 15 días de iniciado su funcionamiento hasta que los resultados obtenidos sean estables y no existan efluentes más contaminados que los afluentes, para ninguna de las etapas del sistema. Vencido este período puede comenzarse con el proceso de muestreo programado para definir eficiencias del sistema. Es conveniente que durante dicho tiempo no se instale el geotextil para permitir que la carga contaminante proveniente del lavado de la grava se elimine libremente y, de esta manera, evitar una colmatación precoz del geotextil.
- Una estrategia para disminuir el período de estabilización del filtro piloto consiste en aplicar una sobrecarga, aumentando el caudal inicial 2, 5, 10 ó más veces respecto al caudal de diseño, según criterio del operador, al observar el comportamiento interno del filtro y características físicas del efluente.
- Así como debe garantizarse un período de estabilización, también debe tenerse presente un período de maduración del filtro, principalmente para programar las pruebas microbiológicas de coliformes (fecales y totales), por cuanto a que para éstas tiene gran influencia la formación de una biopelícula que ayuda en la remoción de dichos microorganismos. Para esto se necesita, según experiencias previas con filtros piloto, por lo menos dos meses de maduración.
- Como el filtro piloto se construyó utilizando acrílico para permitir la observación de los estratos de grava y del geotextil, se debe tener la precaución de cubrirlo permanentemente de los rayos del sol, ya que de lo contrario se generaría y estimularía un proceso de fotosíntesis en el interior del filtro que podría causar saturación prematura del geotextil con algas y generación de color.
- Durante el análisis de muestras en el laboratorio para la obtención del color aparente y verdadero se debe verificar, inicialmente, que las celdas de vidrio utilizadas con el colorímetro electrónico estén completamente limpias, libres de cualquier suciedad que pueda afectar los resultados. Esto podría efectuarse ensayando muestras patrones (“blancos”) en cada una de las celdas que se van a utilizar, para las cuales se deben obtener valores de color muy próximos o iguales a cero. De otro modo, también podrían utilizarse métodos convencionales, como el comparativo o usando el espectrofotómetro.
- Cuando se realice el mantenimiento (lavado) del filtro piloto, parte de los lodos e impurezas que se desprenden de la grava y geotextil salen en el efluente, por lo que las características del agua se afectan. Por este motivo es necesario esperar uno o inclusive dos

días de nueva estabilización del sistema para evitar resultados irregulares (% de remoción muy bajos o negativos).

- Pueden proponerse diversas variantes que pueden ser aplicadas al sistema de filtración para mejorar su eficiencia; por ejemplo, podría cambiarse el geotextil NT – 2.000 por otro natural (recomendado por el instituto Cinara) o por otro sintético pero de mayor espesor y menor porosidad (NT – 2.500 ó NT – 3.000, entre otros); también puede variarse la ubicación del geotextil respecto a las etapas o unidades de filtración en el conjunto o, por otro lado, podría adicionarse un estrato de arena a continuación del geotextil, simulando un filtro lento en arena (FLA). También se habla de colocar dos geotextiles de iguales o diferentes características, uno a continuación de otro. De todas maneras, estas variaciones deberán ser debatidas, acordadas y evaluadas por los siguientes grupos de trabajo para las siguientes etapas del proyecto de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

CALVACHE, Bernardo. Guías para laboratorios de Química Sanitaria. Pasto : Universidad de Nariño, 1997. 60 p.

CASTRO URRESTA, Ruth Elena y TÉLLEZ SALAS, Eliana Karina. Uso de geotextil y otros materiales en procesos de filtración lenta en arena para pequeñas comunidades : prefiltración. Pasto 1997, 160 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Decreto 219 de 2000 : Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS – 2000. Bogotá : El ministerio, 2000. p. 11–49.

COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Decreto 475. Bogotá : El ministerio, 1998. 39 p.

FERNÁNDEZ J., Alberto et al. Uso de fibras naturales y sintéticas en filtración lenta en Colombia. Cali : CINARA, 1995. 67 p.

GALVIS CASTAÑO, Gerardo; LATORRE MONTERO, Jorge y TEUN VISSCHER, Jan. Filtración en Múltiples Etapas : tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Cali : Artes Gráficas Univalle, 1999. 185 p.

GARCÍA ESPAÑA, Patricia y VELA, Ana Cristina. Usos del geotextil y otros materiales en los procesos de filtración lenta en arena. Pasto 1993. 153 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Normas colombianas para la presentación de tesis de grado. Bogotá : ICONTEC, 2002. 104 p.

LOODSRECHT, Van et al. En: GALVIS CASTAÑO, Gerardo; LATORRE MONTERO, Jorge y TEUN VISSCHER, Jan. Filtración en Múltiples Etapas : tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Cali : CINARA, 1999. p. 15–17, 33–40.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Guías de Calidad de Agua para Consumo Humano : recomendaciones. Génova : OMS, 1993. v.1, 34 p.

PAVCO S.A. Manual de especificaciones técnicas sobre geotextiles. Bogotá : PAVCO, 2002. 19 p.

PÉREZ, Jorge Arturo. Manual de potabilización del agua. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 1990. p. 247–349.

PROYECTO INTEGRADO de Investigación y Demostración en Filtración Múltiple por Etapas : Versión resumida. Cali : CINARA, 1999. 57 p.

SILVESTRE, Paschoal. Fundamentos de Hidráulica General. México : Limusa, 1983. p. 111–117.

SOLARTE ORTIZ, Romel Wilson. Utilización del geotextil no tejido # 1600 y arena de peña en procesos de potabilización de agua por filtración lenta : captación dinámica. Pasto 1999. 107 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

WEGELIN M., GALVIS G. y MONTERO J. La filtración gruesa en el tratamiento de aguas superficiales. Cali : CINARA, 1998. p. 14–22.

ANEXO

