



**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA FILTRACIÓN EN
GRAVAS DE FLUJO ASCENDENTES A ESCALA REAL**

DIANA MARÍA POSSO MARÍN

**Trabajo de Grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Ingeniera Sanitaria**

Director: Ing. Luis Darío Sánchez, MSc, Instituto Cinara

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE**

UNIVERSIDAD DEL VALLE

SANTIAGO DE CALI

2012

Dedicado a mis padres y familiares por su amor y apoyo incondicional.
“Y si alguno de nosotros tiene falta de sabiduría pídale a Dios el cual da a todos
abundantemente y sin reproche y le será dada. Santiago 1:5”

Los grandes proyectos, siempre están rodeados de grandes colaboradores, por esto quiero presentar mis:

AGRADECIMIENTOS

A Dios, el supremo maestro que me ilumina con su luz.

A mis padres, por el don precioso de la vida.

A mis docentes, por forjarme como una profesional con alto sentido de pertenencia hacia su entorno.

A mi director de trabajo de grado, Ms Luis Darío Sánchez Torres, quien siempre me alentó a seguir adelante y confió plenamente en mis capacidades.

Al Instituto Cinara por su apoyo económico para las mediciones de campo y de laboratorio, a través del proyecto de investigación *Filtración en gravas de flujo ascendente para múltiples usos*.

Al Ingeniero Carlos Humberto Mejía, por su constante colaboración en el desarrollo del trabajo investigativo.

A las Juntas administradoras de los acueductos de: Golondrinas, Arroyohondo, La Sirena y El Retiro y los operadores: Leonardo Meneses, Alfonso Escandón, Ever Tosse, Libardo Ortiz y Gabriel Morcillo, que de una u otra forma estuvieron prestos a colaborar en todos los requerimientos y con quienes fue altamente gratificante compartir el tiempo de trabajo de campo.

A todos los miembros de mi familia y compañeros de estudio, por su incondicional apoyo.

CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCION	4
2 JUSTIFICACIÓN	6
3 OBJETIVOS	9
3.1 General	9
3.2 Específicos	9
4 MARCO TEORICO	10
4.1 Filtración en gravas	10
4.2 Operación y mantenimiento	14
5 METODOLOGÍA	16
5.1 Descripción de las plantas estudiadas	16
5.1.1 Planta La Sirena	16
5.1.2 Planta Arroyohondo	17
5.1.3 Planta el Retiro	18
5.1.4 Planta Golondrinas	19
5.2 Procedimiento para la toma de datos	21
5.2.1 Diseño de formatos para recopilación de información.	21
5.2.2 Elaboración e instalación de regla de aforo y regla de pérdida de carga.	22
5.2.3 Caracterización de los medios filtrantes en las plantas estudiadas	23
5.3 Operación y mantenimiento de los FGAC	25
5.3.1 Operación de los FGAC	25
5.3.2 Mantenimiento de los FGA	26
5.4 Eficiencia	27
5.4.1 Calidad de agua	27

5.4.2	Análisis Hidráulico de los FGAC (prueba de trazadores)	28
5.4.3	Velocidad de sedimentación y diámetro de partículas en los filtros en grava	29
5.5	Ajustes de operación y mantenimiento	30
5.5.1	Revisión hidráulica de las unidades FGAC	30
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
6.1	Operación y Mantenimiento de los FGAC	32
6.1.1	Caracterización de medios filtrantes	32
6.1.2	Operación	34
6.1.3	Mantenimiento	36
6.1.4	Costos	38
6.2	Eficiencia en los FGAC	40
6.2.1	Calidad de agua	40
6.2.2	Eficiencias de remoción según las velocidades de filtración	42
6.2.3	Seguimiento de turbiedad en la Sirena	46
6.2.4	Comportamiento hidráulico de los FGAC	48
6.2.5	Velocidad de sedimentación	51
6.3	Revisión hidráulica de las unidades FGAC	53
6.4	Principales problemas en las plantas de tratamiento	55
7	CONCLUSIONES	57
8	RECOMENDACIONES	60
9	BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Guías de diseño para FGAC	12
Tabla 2	Eficiencias típicas de tratamiento por filtros gruesos ascendentes	13
Tabla 3	Actividades diarias de operación en filtros gruesos ascendentes	15
Tabla 4	Pasos para el cálculo de densidad del medio filtrante	24
Tabla 5	Guía de revisión de cada FGAC	26
Tabla 6	Frecuencia de medición de parámetros	27
Tabla 7	Tamaño de grava	32
Tabla 8	Caracterización del medio filtrante	33
Tabla 9	Criterios de diseño y operación en los FGAC	34
Tabla 10	Pérdidas de carga en las plantas	35
Tabla 11	Tiempo en minutos de actividades de mantenimiento	37
Tabla 12	Observaciones de O&M	37
Tabla 13	Costo por metro cúbico en las plantas (2010)	39
Tabla 14	Calidad de agua cruda y efluente FGAC	41
Tabla 15	Remoción de turbiedad Sirena	46
Tabla 16	Características de los FGAC para analizar comportamiento hidráulico	49
Tabla 17	Resultados del modelo Wolf- Resnik en cada FGAC por planta	49
Tabla 18	Índice de Morrill	50
Tabla 19	Estimación de las pérdidas con la tasa de lavado de operación medida	53
Tabla 20	Estimación de pérdidas con tasa de lavado recomendada.	54
Tabla 21	Principales problemas en las plantas	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de un filtro grueso de flujo ascendente en capas (FGAC)	12
Figura 2 Planta La Sirena	17
Figura 3 Planta Arroyohondo	18
Figura 4 Unidades FGAC Planta Retiro	19
Figura 5 Planta Golondrinas	20
Figura 6 Esquema de las plantas estudiadas	21
Figura 7 Parámetros de medición	28
Figura 8 Medición de la conductividad en el filtro	28
Figura 9 Columna de sedimentación (dimensiones)	30
Figura 10 Diferencias en la salida de agua de lavado de los FGAC	38
Figura 11 Remoción turbiedad	42
Figura 12 Remoción Color	44
Figura 13 Remoción de Coliformes totales	44
Figura 14 Remoción de E-coli	45
Figura 15 Remoción de turbiedad en la Sirena	47
Figura 16 Pico de turbiedad – Sirena	48
Figura 17 Reactores en serie plantas	51
Figura 18 Velocidad de asentamiento	52

RESUMEN

La Filtración en Múltiples Etapas, FiME es una alternativa tecnológica para mejoramiento de la calidad de agua de consumo que actualmente es aprovechada en comunidades rurales. FiME consta de tres etapas de tratamiento: Filtro Grueso Dinámico (FGDi), Filtro Grueso Ascendente (FGA) que son pre-tratamientos en medios granulares gruesos y Filtro Lento en Arena (FLA) como etapa microbiológica. Este trabajo de grado se orientó a entender el funcionamiento a escala real de los FGA. El estudio se realizó en las siguientes plantas de tratamiento: El Retiro, La Sirena, Golondrinas y Arroyohondo de la zona rural y periurbana de Cali.

En las 4 plantas se evaluaron las condiciones de operación y mantenimiento y se analizó la eficiencia de tratamiento en las unidades de Filtración gruesa ascendente en capas (FGAC) según la variación de la calidad del agua cruda. Los resultados indican que en todas las plantas de tratamiento los FGAC funcionan de manera continua y garantizan un buen pre-tratamiento para los filtros lentos en arena como barrera final de tratamiento microbiológico.

En las cuatro unidades de FGAC analizadas se evidenció poca variación en la pérdida de carga entre cada carrera de filtración (<0.05 m), a pesar de esto a las unidades se les hace mantenimiento cada semana. Se evidenciaron sobrecargas de caudal en La Sirena con valores del 57%, mientras que en Golondrinas se trabaja por debajo de su capacidad, pues su caudal alcanza solo el 80.7% del caudal de diseño. En las demás plantas los filtros operan con el caudal de diseño.

Los tiempos de mantenimiento de cada unidad de filtración en grava de flujo ascendente en horas hombre por metro cuadrado fueron los siguientes: La Sirena 0,07, Golondrinas 0,1, El Retiro 0,04 y en Arroyohondo 0,05. Aunque el lavado de los filtros por parte de los operadores es apropiado, para el lavado superficial de la grava de los FGAC se encontró

que hay evacuación rápida del agua superficial en El Retiro y Arroyohondo por la presencia de vertederos frontales con canales recolectores; mientras que en los de La Sirena y Golondrinas, hubo limitaciones en la evacuación por el sistema de orificios que tienen para la evacuación.

Los costos de operación por m^3 de agua producida en cada planta fueron los siguientes: La Sirena $275 \text{ \$/m}^3$, Golondrinas $67 \text{ \$/m}^3$, El retiro $225 \text{ \$/m}^3$ y en Arroyohondo $477 \text{ \$/m}^3$. Los costos de personal representan el mayor porcentaje sobre el total de costos de operación, exceptuando Arroyohondo, donde se manejan costos altos por consumo de energía para el bombeo del agua a la planta.

Las fuentes de suministro presentaron alto riesgo microbiológico en términos de Coliformes totales y de E-Coli, para las plantas de Arroyohondo y el Retiro y de menor riesgo para La Sirena y Golondrinas. El FGAC con mayor desempeño en cuanto a remoción de turbiedad fue la de El Retiro con un percentil 50 $P_{50} < 56\%$; con relación a la remoción de color El FGAC de mejor desempeño fue el de Arroyohondo con un $P_{50} < 40\%$ y en la remoción de microorganismos (E-coli), el FGAC de mejor desempeño en la remoción fue Golondrinas con $P_{50} < 0,6 \text{ log}$,

Al observar las variaciones en la velocidad de filtración en la planta de La Sirena, se evidenció mejor desempeño cuando el filtro no es sobrecargado y trabaja con la velocidad de diseño, en ese caso la remoción de turbiedad fue de $P_{50} < 20\%$. Cuando en el filtro se incrementó en un 57% la velocidad de filtración la eficiencia de remoción de turbiedad bajo a $P_{50} < 15\%$.

El comportamiento hidráulico analizado mediante prueba de trazadores en los FGAC, mostró que estas unidades presentan flujo dual (pistón y mezcla completa), con presencia de zonas muertas. La fracción de flujo a pistón varió entre 20-57%, la fracción mezclada entre 27-60% y las zonas muertas entre 2-23%. Situación que se relaciona con los tiempos

de retención del agua en el FGAC y a su vez con la eficiencia de remoción de parámetros de calidad de agua.

La revisión hidráulica de las unidades FGAC, indicó, que ninguna de las plantas cumple con el valor mínimo de tasa de lavado recomendado para los FGAC de 15 m/h, lo cual puede afectar el tiempo de limpieza de la unidad y la eficiencia de lavado.

A partir de esta investigación y con base en los resultados obtenidos se debe revisar el criterio de lavados semanales, pues la pérdida de carga no crece de manera acelerada y la eficiencia remocional del filtro se puede afectar.

Optimizar el lavado superficial, en Golondrinas y la Sirena es crucial ya que el actual sistema de lavado por orificio no permite una eficiente evacuación del agua superficial con sólidos. El estudio plantea la necesidad de instalar sistemas de evacuación rápida como se pudo apreciar en el Retiro y Arroyohondo.

El seguimiento de la calidad del agua en estas unidades es crucial al menos en parámetros básicos como turbiedad, color y pH. Se debe implementar un sistema de registro de la calidad del agua y de las actividades de operación y mantenimiento.

Se debe hacer la optimización del lavado hidráulico en las plantas estudiadas siguiendo cada una de las recomendaciones propuestas en este trabajo y servir de referencia para futuros diseños de FGAC en plantas FiME. Se recomienda desarrollar más investigación en la frecuencia de lavado de los filtros.

Palabras Claves: Filtración en Múltiples Etapas, Filtro Grueso Ascendente en Capas, Operación y mantenimiento.

1 INTRODUCCION

El acceso al agua potable y saneamiento en nuestro país y la calidad de estos servicios ha aumentado significativamente durante la última década. Sin embargo, aún quedan desafíos importantes, debido a una cobertura insuficiente de los servicios, especialmente en zonas rurales, y a una calidad inadecuada de los servicios de agua y saneamiento.

La cobertura total nacional (zona urbana y rural) de agua potable es del 83,57% donde la población rural representa aproximadamente el 23% de la población total del país, mostrando las tasas de cobertura más bajas, ya que sólo el 47.23% tiene acceso a agua potable, mientras que la zona urbana que representa la mayoría de la población del país tiene una cobertura del 94,52%(CGR, 2007). A nivel regional en el Valle del Cauca en las áreas urbanas la cobertura de agua potable es del 95% y en la zona rural el cubrimiento con infraestructura es del 75%, mientras que la cobertura efectiva con suministro de agua potable es del 35% únicamente (SISAV, 2003).

En países como Colombia, el limitado acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento es uno de los rasgos más visibles de la pobreza y constituye unas de las expresiones más evidentes de exclusión social de la cual habla la CEPAL en el Panorama social de América Latina 2007, según una evaluación sobre las principales tendencias sociales de la región (OEI y CEPAL, 2007).

Esta situación provoca grandes problemas de salubridad en los grupos más vulnerables, sobre todo en los residentes de áreas rurales, en la periferia urbana y dentro de los miembros de los pueblos originarios (indígenas) (CGR, 2007).

En la búsqueda de soluciones para las necesidades de mejoramiento de la calidad de agua en asentamientos humanos que utilizan fuentes superficiales, se desarrolló la tecnología de filtración en múltiples etapas (FiME). La tecnología FiME es una combinación de la filtración en gravas (Filtros Gruesos) y la filtración lenta en arena (FLA). Esta combinación

permite el tratamiento de agua con niveles de contaminación superiores a los que se pueden tratar utilizando solo FLA y es mucho más sostenible en pequeñas comunidades que los sistemas de tratamiento con sustancias químicas (Sánchez *et al.*, 2006).

FiME, puede estar conformada por dos o tres componentes o etapas principales de filtración, dependiendo de los niveles de contaminación en la fuente. Uno de los componentes claves de FiME es la filtración en grava ascendente en capas (FGAC), el cual es usado como pretratamiento para facilitar el trabajo biológico del FLA, teniendo como rol principal la acumulación de sólidos en el fondo del filtro donde se localiza el sistema de drenaje, facilitando así el lavado hidráulico de fondo de las unidades (Galvis *et al.*, 1999).

A pesar de que FiME es una tecnología viable para pequeños sistemas de agua, la deforestación y erosión, la contaminación por residuos sólidos, pesticidas y materia fecal, así como los efectos por el cambio climático, deterioran la calidad de agua de las cuencas abastecedoras, perjudicando así el funcionamiento de todos los componentes del sistema. Por esto es necesario que la cuenca o microcuenca abastecedora este bien protegida, que las estructuras de tratamiento de agua estén en buen estado y se les realice una adecuada operación y mantenimiento (O&M), con el fin de asegurar que la planta de tratamiento funcione efectivamente a través del tiempo (Vargas *et al.*, 1998).

Teniendo en cuenta que la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de agua, en particular de FiME y sus componentes, constituye un elemento crítico en funcionamiento sostenible del sistema de tratamiento de agua potable, este trabajo de grado analiza las condiciones de operación y mantenimiento de cuatro filtros en grava de flujo ascendente en capas para sistemas de suministro de agua potable con tecnología FiME en los alrededores de la ciudad de Cali.

2 JUSTIFICACIÓN

Debido a las limitaciones asociadas con el deterioro de las cuencas por deforestación y erosión, además de la descarga de aguas residuales sin tratar en las fuentes, los sistemas de tratamiento de agua potable cada día requieren mayores exigencias en operación y mantenimiento. Cuando los niveles de deterioro de la calidad del agua en la fuente son altos, las tecnologías de tratamiento seleccionadas pueden requerir de barreras adicionales para garantizar agua de buena calidad, lo cual puede afectar los costos del servicio y la sostenibilidad de la tecnología.

Las manifestaciones directas del cambio climático en los países Andinos se refleja en incrementos en los períodos secos y mayor intensidad de la lluvia. En época seca se disminuye la dilución y aumenta la contaminación, mientras que en época de lluvias, debido a los procesos erosivos, se aumentan los picos de turbiedad y sólidos suspendidos, los cuales ocurren con más duración y mayor frecuencia, haciendo más exigente las condiciones de operación y mantenimiento y algunas veces limitando la aplicación de la tecnología. Esta situación se ha vuelto más compleja por el deterioro de las condiciones ambientales de las fuentes superficiales, por la descarga de aguas residuales domésticas, industriales, agropecuarias y de residuos sólidos; ya que se estima que solo el 9% de las aguas residuales en Colombia son tratadas antes de descargarlas a las fuentes hídricas (El Espectador, 2008).

Este trabajo de grado “Análisis de la operación y mantenimiento de la filtración en gravas de flujo ascendentes a escala real”, busca profundizar en el entendimiento de la filtración en gravas de flujo ascendente para analizar formas de operación y mantenimiento que son críticas para la sostenibilidad de la tecnología FiME y para revisar si es necesario hacer ajustes en las condiciones de operación y mantenimiento existentes.

En general, la operación de los filtros gruesos ascendentes esta relacionada con el control de la velocidad de filtración, pérdida de carga y el control de la calidad de agua efluente y

el mantenimiento esta asociado con la limpieza de las unidades y las acciones tendientes a prevenir o reparar daños (Galvis *et al.*, 1999).

Este estudio es clave ya que los sistemas FiME se aplican en más de 140 sistemas de suministro de agua en Colombia y los cambios actuales de calidad del agua cruda pueden afectar la aplicación y futuro desarrollo de la tecnología. Por lo tanto la introducción de ajustes operacionales y de mantenimiento ayudará a la sostenibilidad de sistemas existentes y a potencializar su uso para comunidades que aún no cuentan con acceso al agua potable.

El mantenimiento del sistema de tratamiento es uno de los requisitos más importantes para proteger la inversión y asegurar que la infraestructura se utilice para los fines previstos durante la vida útil estimada. Una infraestructura de tratamiento de agua no se debe construir si no se pueden cubrir los costos que implican su uso y el mantenimiento correspondiente (Vargas *et al.*, 1998). Estudios internacionales comparativos indican que la inversión de un dólar en la operación y mantenimiento ahorra entre 5 y 10 dólares de inversión en nueva infraestructura (INASET, 2008). La operación y el mantenimiento adecuado requieren arreglos institucionales que aseguren un flujo regular de financiamiento (tanto por el lado de los ingresos como por el de los egresos) y una ejecución sistemática de actividades.

Por esta razón, la magnitud de la necesidad de recursos para cubrir los costos de operación y mantenimiento es fundamental para definir las tecnologías y los costos vía tarifas. A menudo la sostenibilidad de las inversiones se pone en riesgo si no se analiza a profundidad los impactos de tales costos para los usuarios en especial para los más pobres.

La ausencia de participación comunitaria en muchas etapas del ciclo del proyecto y en particular, la poca claridad sobre los roles y responsabilidades durante la etapa de operación y mantenimiento redundan en la débil apropiación y responsabilidad social de la comunidad en la operación y administración de la infraestructura (INASET, 2008). Por lo anterior la planta de tratamiento debe estar preferiblemente cerca de la población, para facilitar labores

de supervisión del trabajo del operador y así promover la participación de la comunidad permitiéndoles establecer formas de expresión y la oportunidad de manifestar sus necesidades. Debido a estos factores, el plan de operación y mantenimiento de las instalaciones debe definirse en la etapa de diseño y debe estar de común acuerdo con los recursos disponibles localmente, con la capacidad tecnológica de la comunidad y con su cultura (Quiroga y Visscher, 1999).

Una vez definida la viabilidad de una alternativa de tratamiento, en el sentido de manejar eficientemente los factores de riesgo, de ser compatible con la conservación del medio ambiente y con la cultura de la comunidad usuaria, se debe analizar el impacto de la tecnología sobre la tarifa. Si se quiere comparar costos, estudiar tarifas o revisar el impacto del periodo de diseño, se deben convertir los costos de construcción y recurrentes en unidades comparables en el tiempo.

La diferencia en los costos de operar y mantener un sistema FGAC esta representada por el tiempo requerido por el operador al efectuar la limpieza superficial de cada filtro o por la cantidad de agua empleada al lavar uno u otro sistema. Existe, sin embargo, una mayor diferencia en términos del tiempo que debe permanecer cada sistema de filtración gruesa fuera de operación por ejecución del lavado, particularmente durante el lavado mensual, ya que para efectuar el mantenimiento de las segundas y terceras etapas, se hace necesario esperar el llenado de las etapas previas una vez concluido su lavado (Galvis *et al.*, 1999).

Con este trabajo de grado se analiza la situación actual de O&M en cuatro plantas que usan FGAC con FiME en zonas aledañas a Cali, profundizando en las lecciones aprendidas, incluyendo los resultados de la sistematización, así como ajustes y complementaciones a partir del trabajo de campo.

3 OBJETIVOS

3.1 General

Contribuir al estudio, optimización y mejoramiento de las condiciones de operación y mantenimiento de los sistemas de filtración en grava de flujo ascendente en capas que es un pretratamiento clave de la filtración en múltiples etapas (FiME).

3.2 Específicos

- Revisar las condiciones de operación y mantenimiento de cuatro filtros en grava de flujo ascendentes en capas de plantas FiME a escala real.
- Analizar la eficiencia de tratamiento en las unidades de filtración en grava de flujo ascendente según la variación de la calidad del agua cruda.
- Identificar posibles ajustes para la operación y mantenimiento de los filtros gruesos ascendentes.

4 MARCO TEORICO

En las comunidades más pequeñas del mundo en desarrollo el hecho de llevar agua hasta los hogares es una cuestión muy compleja, no solamente por los altos costos que representa sino también porque las fuentes de agua pueden mostrar variaciones considerables en cuanto a su calidad y a su cantidad. De hecho, es muy posible que la población no vea la calidad del agua como una prioridad (Visscher, 2006).

Investigadores de Cinara, junto con el Centro Internacional de Referencia para el Agua y Saneamiento (IRC, por sus siglas en ingles) de Holanda, adelantaron un proyecto de investigación y demostración sobre filtración lenta en arena (FLA). A través de dicha investigación, se buscó dar utilidad de esta tecnología con el fin de probarla y compartirla con las comunidades necesitadas del suministro de agua potable. El proceso fue aceptable pero se consideró que no era suficiente como único proceso de tratamiento. En particular, el mantenimiento de los filtros fue identificado como un problema, agravado por los altos picos de turbidez en algunos de los ríos tropicales usados como fuente de abastecimiento en dicho estudio. Esto conllevó al desarrollo de la filtración en múltiples etapas (FiME), una tecnología avanzada con un potencial de utilización más amplia que incluía como pretratamiento la filtración en grava de flujo ascendente (Visscher, 2006).

4.1 Filtración en gravas

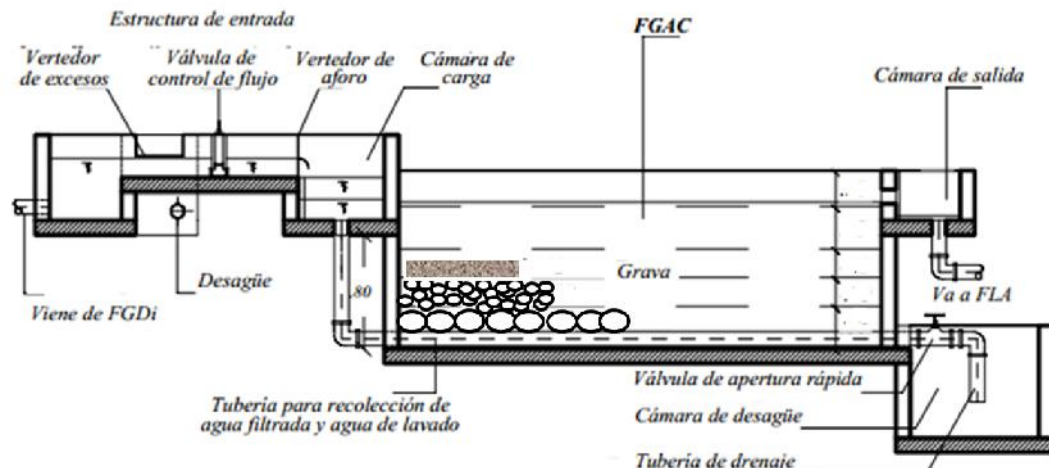
En abril de 1973 un número de directores de diferentes instituciones pertenecientes a cuatro países en desarrollo, colaboraron con el IRC y se reunieron en Bilthoven - Holanda, para evaluar problemas en el sector del agua en sus países y para discutir posibles soluciones (Visscher, 2006). Una conclusión importante de ésta reunión fue que los tratamientos de agua adecuados para lograr una buena calidad a menudo no están disponibles para los países en vía de desarrollo. Identificaron la FLA como posible solución y se le asignó la máxima prioridad a la investigación sobre esta tecnología en diferentes condiciones

climáticas. En este proceso de tratamiento, el agua pasa a través de un lecho de arena. Se afirma que FLA es un método eficaz para purificación de las aguas superficiales contaminadas. En particular su capacidad para eliminar microorganismos hace que este proceso sea adecuado para el tratamiento de agua. Sin embargo, en fuentes con variaciones de la calidad del agua entre los periodos de lluvia y secos el mantenimiento es un problema debido a las dificultades para tratar altos niveles de turbiedad, característica común de muchos ríos tropicales, por el aumento de la erosión en las cuencas abastecedoras (Visscher, 2006). En ese sentido, el Instituto CINARA y el IRC, con apoyo del gobierno de Holanda adelantaron una investigación a escala piloto utilizando diferentes combinaciones de filtros en grava y FLA, haciendo uso del agua del río Cauca en las inmediaciones de la ciudad de Cali, Colombia. Al mismo tiempo, se desarrolló un trabajo con sistemas a escala real, construidos en la región del Valle del río Cauca, lo cual permitió la consolidación de la tecnología de FiME, una combinación de filtración de grava (FG) y FLA. La FiME conserva las ventajas de la FLA como una tecnología robusta y confiable, que puede ser mantenida por operadores con bajos niveles de escolaridad.

Los Filtros en grava (FG) (ver Figura 1), 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 del material filtrante favorecen el proceso de sedimentación que sumado a las bajas velocidades de filtración, contribuyen a la generación de otros procesos como absorción y procesos de tipo químico y biológico (Wegelin *et al.*, 1997).

Diferentes tipos de FG pueden utilizarse como pretratamiento del filtro FLA. Estas líneas se diferencian por el número de unidades, las características de las gravas dentro de las unidades y el tipo de flujo del agua: ascendente, horizontal, descendente y en serie. Los Filtros Gruesos (FG) permiten mejorar la eficiencia en remoción y la operación de los FLA. En cada FG el agua pasa a través de un lecho de grava mejorando la calidad físico-química

y bacteriológica del agua mediante procesos físicos, biológicos y químicos. Los criterios de diseño para Filtros Gruesos Ascendentes en Capas (FGAC) se presentan en la Tabla 1, basados en experiencias en unidades experimentales y a escala real.



Fuente: (Galvis *et al.*, 1999)

Figura 1 Esquema de un filtro grueso de flujo ascendente en capas (FGAC)

Tabla 1 Guías de diseño para FGAC

Criterio	Valores Recomendados
Período de diseño (años)	8-12
Período de operación (h/d)	24
Velocidad de filtración (m/h) ⁽¹⁾	0.3-0.6
Numero de unidades en serie FGAC	1
Lecho filtrante	
• Longitud total (m) FGAC	0.6-0.9
• Tamaño (mm)	1.6 – 25
Lecho de soporte total	
• Longitud (m)	0.3-1.25
• Tamaño (mm) ⁽²⁾	1.6-25
Altura de sobrenadante de agua (m)	0.1-0.2
Carga estática mínima de agua para lavado de contra flujo (m) ⁽³⁾	3.0
Área de filtración por unidad (m ²)	< 20

(1) A mayor contaminación del agua afluente, menor velocidad de filtración.

(2) Depende del tamaño de grava predominante en cada unidad.

(3) Diferencia entre el nivel de agua máximo en el filtro grueso ascendente durante el lavado y el nivel de descarga de la tubería de drenaje en la cámara de lavado.

Fuente: Galvis *et al.* (1999)

Otro tipo de FG, es la filtración gruesa de flujo ascendente en serie (FGAS), la cual es usada para tratar aguas más contaminadas. Este sistema consta de dos o tres unidades con diferentes tamaños de grava.

En los FGAC cada unidad consta de diferentes tamaños de grava comenzando con granos gruesos en la primera etapa hasta finos en la última, la altura es usualmente inferior a 2 m. El aumento de la profundidad del lecho de filtración incrementa la capacidad de almacenamiento de sedimentos y la eficiencia de la remoción, pero podría hacer la limpieza hidráulica más compleja (Galvis *et al.*, 1999).

En la Tabla 2 se presentan remociones típicas encontradas en sistemas de filtración gruesa ascendente, tanto en capas como en serie, tratando aguas superficiales de valle y de ladera. Los filtros gruesos operaron con velocidades de filtración entre 0.3 m/h y 0.75 m/h, con lechos filtrantes entre 1.0 y 1.55 m de longitud.

Tabla 2 Eficiencias típicas de tratamiento por filtros gruesos ascendentes

Parámetro	Reducción típica
Sólidos suspendidos	Alcanza hasta el 95%, siendo 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	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 20000 a 100000 UFC/100 ml y contenido de sólidos suspendidos entre 20 y 200 mg/l. La menor eficiencia se presentó con fuentes de calidad bacteriológica entre 500 y 20000 UFG/100 ml.

Fuente: Galvis *et al.* (1999)

4.2 Operación y mantenimiento

La operación se entiende como el conjunto de acciones que se deben realizar para que la planta de tratamiento funcione bien y el mantenimiento es el conjunto de acciones, que se deben realizar para prevenir o reparar los daños que se pueden presentar en la planta de tratamiento (Vargas *et al.*, 1998).

A través de la cámara de entrada se realiza el control sobre la operación de los filtros, pues un incremento en el nivel de agua en la cámara, significa un aumento en la resistencia hidráulica del filtro grueso. Durante la carrera de filtración y con lecho limpio, se genera una diferencia estática 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 de carga entre los dos puntos, para el caudal de operación en la unidad. La pérdida de carga en el filtro esta asociada a la acumulación de sólidos suspendidos en el medio filtrante, lo cual se ve reflejado en el incremento de nivel de agua en la cámara de entrada. La pérdida de carga a su vez permite al operador tener control sobre las rutinas de mantenimiento.

La operación de los filtros gruesos ascendentes está relacionada con el control de la velocidad de filtración y el control de la calidad de agua efluente, mientras que para el mantenimiento, la medición de pérdida de carga en la unidad de filtración permite al operador tener control sobre las rutinas de limpieza y eficiencias de las unidades (Galvis *et al.*, 1999). En la tabla 3, se muestran las actividades diarias de operación en los FGAC.

La frecuencia de lavado del FGAC, depende en gran proporción de las características del agua cruda, de la disposición y operación del FGAC. La mayoría de las partículas en las aguas superficiales tropicales están compuestas generalmente de materia inorgánica estable, la cual no modifica las propiedades químicas del agua que pasa a través del filtro lo que permite que pueda almacenarse en la unidad sin efectos negativos; sin embargo, niveles elevados de materia orgánica requieren limpieza frecuente y regular para evitar su

descomposición y prevenir el deterioro de calidad de agua en cuanto a sabor y olor (Wegelin *et al.*, 1997).

Tabla 3 Actividades diarias de operación en filtros gruesos ascendentes

Actividad	Acciones claves
Medición y control del caudal	• Verificar el nivel de agua en la rejilla de aforo de cada unidad. • Ajustar la válvula de entrada hasta alcanzar el caudal de operación
Medición de turbiedad	• Medir turbiedad del agua a la entrada del filtro grueso ascendente. • Cerrar la válvula cuando la turbiedad del agua afluente sea mayor que el valor previsto para operación normal.
Retiro de material flotante	• Retirar material desprendido del lecho filtrante con una nasa.
Registro de información	• Anotar en el libro de registro diario los valores de turbiedad en el ingreso y salida del filtro. • Cambios en el caudal durante el día. • Fecha del lavado del filtro.
Medición de pérdida de carga	• Medir nivel de agua en la cámara de entrada del filtro. • Lavar el filtro cuando la pérdida de carga sea mayor que el valor esperado al finalizar la carrera de filtración.
Limpieza superficial de la grava	• Cerrar salida de agua filtrada. • Abrir tapones laterales o adaptadores de limpieza, en el caso de que la salida sea por orificios. • Remover la superficie de la grava, hasta que el agua de lavado aclare, utilizando una pala metálica. • Cerrar tapones laterales y entrada de agua para hacer lavado hidráulico.
Limpieza hidráulica del filtro	• Realizar dos drenajes del filtro siguiendo las recomendaciones del lavado semanal. Antes de iniciar el segundo lavado, llene el filtro. • Abrir entrada de agua. • Abrir salida de agua.

Fuente: Galvis *et al.* (1999)

5 METODOLOGÍA

El estudio se llevó acabo en unidades de FGAC a escala real teniendo en cuenta las condiciones de diseño y de operación y mantenimiento (O&M) para las plantas FiME, de La Sirena, Arroyohondo, El Retiro y Golondrinas, ubicadas en área rural de los municipios de Cali y Yumbo.

5.1 Descripción de las plantas estudiadas

5.1.1 Planta La Sirena

La Sirena, es un asentamiento periférico de la zona de ladera, ubicado al suroccidente de la ciudad de Santiago de Cali en la comuna 19. Aunque su población es de escasos recursos, la organización comunitaria logró gestionar con apoyo de las instituciones gubernamentales un acueducto que está bajo su administración. La calidad del agua fue mejorada con una planta de tratamiento FiME.

El proyecto ha sido liderado por la comunidad y apoyado por instituciones del orden local, departamental e internacional, generando una dinámica al interior de la comunidad que les ha permitido adicionalmente adelantar otras obras.

Cuando se inició el proyecto de optimización del acueducto en 1984, La Sirena contaba con 1300 habitantes y 300 viviendas. Actualmente, La Sirena cuenta con alrededor de 863 suscriptores. Dadas las condiciones de buen funcionamiento del acueducto, además de las viviendas del barrio, se han conectado al acueducto algunas viviendas de habitantes de altos ingresos, situadas en la base de la ladera (Restrepo, 2001).

La planta de tratamiento de agua potable ubicada aproximadamente a 3 kilómetros de la cabecera de La Sirena, la cual se compone de dos filtros gruesos dinámicos (FGDi), 3 filtros gruesos ascendentes en la primera etapa, 3 filtros gruesos ascendentes en la segunda

etapa y 2 filtros lentos circulares, con una área total de 500 m². Algunas de estas unidades son presentadas en la Figura 2 a continuación.



Figura 2 Planta La Sirena

5.1.2 Planta Arroyohondo

La parcelación Colinas de Arroyohondo está ubicada al sur oeste del Municipio de Yumbo, en el piedemonte de la cordillera occidental. Sus límites son: por el sur con la ciudad de Cali, al norte con la cabecera municipal de Yumbo, al oriente con el área industrial de la ciudad de Cali y al occidente con los Farallones de Cali.

La Parcelación Colinas de Arroyohondo es abastecida por una planta de tratamiento mixta, la cual combina la tecnología FiME con dosificación de coagulante (sulfato de aluminio) para realizar la coagulación. Esta planta está diseñada para tratar 6 L/s, para 120 viviendas.

La planta está compuesta por 2 FGD_i, una estructura de mezcla rápida para dosificar el coagulante, 2 Floculadores en grava de flujo ascendente (CFGAC), 2 Filtros gruesos ascendentes en capas (FGAC) y 4 Filtros lentos en arena (FLA).

El tamaño actual de la planta es de aproximadamente 800 m², el consumo por vivienda es alrededor de 150 a 200 m³ al mes. La bocatoma se encuentra ubicada a unos pocos metros de la planta donde se toma agua del río Arroyohondo y es bombeada hasta los FGD_i de la planta.

Luego que el agua es tratada abastece a la parcelación por bombeo (Acueducto PARCOLINAR, 2011). Una imagen parcial de la planta de tratamiento es presentada en la Figura 3.



Figura 3 Planta Arroyohondo

5.1.3 Planta el Retiro

El acueducto de la Parcelación el Retiro ha sido administrado por la Junta de Acción Comunal por más de 20 años, la cual gestionó la construcción de su acueducto con sus propios recursos y es el fruto de trabajo mancomunado entre comunidad, líderes y empleados. La tecnología utilizada para la potabilización de agua es la FiME, tecnología que ha funcionado desde el año 1987.

La parcelación El Retiro se encuentra ubicada al suroccidente de la ciudad de Cali, en la zona del río Pance, sector recreativo de Cali, donde se han ido desplazando las clases sociales de alto nivel socioeconómico. Pertenece a la comuna 22, la planta tiene un área de

650 m². Se localiza a una altura de 1.100 metros sobre el nivel del mar. La topografía del sector es ligeramente ondulada, con una temperatura media de 24 grados (Gómez, 2001).

La parcelación “El Retiro” se abastece de una derivación del río Pance, localizada en el Parque de la Salud. Sin embargo, cuenta con un reservorio de almacenamiento de agua cruda con capacidad de 4.000 m³, que le sirve para amortiguar variaciones fuertes de turbiedad en el río Pance generadas por la actividad recreativa en su cuenca los fines de semana, el deterioro de la cuenca y suspensiones por daños en la captación. Tiene un caudal asignado de 30 L/s, la capacidad de la planta es de 20 L/s y se utilizan de 10 L/s a 12 L/s (Acueducto El Retiro, 2011). El sistema cuenta con un reservorio de agua cruda, 4 Filtros Gruesos Ascendentes en capas construidos en el año 2011 y 6 módulos de Filtros Lentos en arena de flujo descendente (la planta ya no cuenta con unidades de FGD) (Acueducto El Retiro, 2011) (Figura 4).



Figura 4 Unidades FGAC Planta Retiro

5.1.4 Planta Golondrinas

Golondrinas es un corregimiento en el norte del municipio de Santiago de Cali. Limita al sur y oriente con el casco urbano de Cali, al occidente con los corregimientos Montebello, La Castilla y La Paz, y al norte con el municipio de Yumbo. El corregimiento de Golondrinas está compuesto por las veredas El Filo, La María y La Fragua, y los sectores

de Tres Cruces Alto y Tres Cruces Bajo. Tiene una población total 2.349 habitantes y una densidad de 2.250 habitantes por km² (DANE, 2005). El acueducto tiene una empresa comunitaria prestadora del servicio encargada de la administración la cual ha gestionado la construcción de la planta de tratamiento, con la que se mejoró la calidad del agua y se ha dado continuidad en el servicio a todos los usuarios.

El corregimiento de Golondrinas está ubicado a lo largo de la franja media y baja de la sub-cuenca del río Aguacatal, la de menor producción de agua, ya que las lluvias no duran mucho tiempo y el suelo ha perdido la vegetación que ayuda a retener el agua, además de presentarse reducciones de caudal entre las épocas de invierno y verano (ESAAG, sin fecha).

La planta de tratamiento de agua potable utiliza la tecnología FiME, la cual se compone de dos FGD_i, 2 FGAC y 4 FLA; el caudal de diseño es de 9 L/s y cuenta con aproximadamente 500 suscriptores. La principal fuente de abastecimiento es la quebrada El Chocho que nace en el corregimiento de La Paz, de la cual se abastece, al igual que algunas fincas y veredas ganaderas de la zona. Esta parte de la cuenca se encuentra bien protegida; sin embargo, al llegar a Golondrinas se observa un grave deterioro, producto de la deforestación y el alto grado de intervención humana (ESAAG, sin fecha) (Figura 5).



Figura 5 Planta Golondrinas

En la Figura 6 se presenta la configuración de cada una de las plantas.

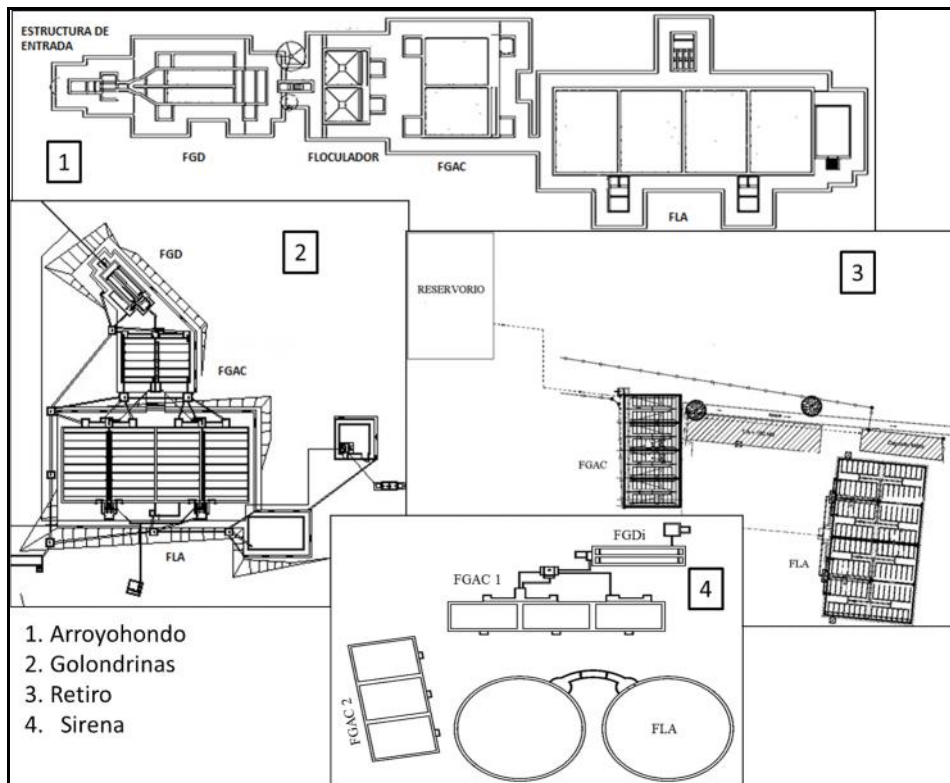


Figura 6 Esquema de las plantas estudiadas

5.2 Procedimiento para la toma de datos

En cada sistema de tratamiento a las unidades de FGAC se les hizo seguimiento y se realizaron las siguientes actividades:

5.2.1 Diseño de formatos para recopilación de información

Se elaboró un formato, para hacer seguimiento diario de pérdida de carga, velocidad de filtración y caudal de operación. El formato se presenta en el Anexo A.

5.2.2 Elaboración e instalación de regla de aforo y regla de pérdida de carga.

Para revisar la operación de los FGAC se tuvieron en cuenta el control de la velocidad de filtración con la regla de aforo, el caudal de operación y la medición de pérdida de carga, la cual orienta al operador para hacer las rutinas de mantenimiento. Para elaborar la regla de aforo se definieron distintas alturas del nivel de agua en el canal abriendo la compuerta. Posteriormente con un balde, cronómetro y una probeta graduada se hicieron mediciones de caudal para cada una de las alturas definidas previamente hasta tener por completo la compuerta abierta para la máxima capacidad del canal. Posteriormente se marcó el cero y se fijó la regla de aforo a una distancia de 0.90 m del vertedero para leer las alturas asociadas a cada caudal en la sección del canal, evitando la deflexión del nivel por contracción en la descarga. Para determinar la velocidad de filtración, V_f , se midió el área del filtro y se asoció a cada caudal registrado en la regla de aforo. Esta medición es para vertedero triangular canal de acceso. El cálculo de V_f se hizo con la Ecuación 1.

$$V_f = \frac{Q}{\pi r^2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde: V_f = velocidad de filtración m/h

Q = Caudal m^3/h

A_f = Área de filtración m^2

En el caso de La Sirena que cuenta con un vertedero triangular, se instaló la regla de aforo en la canaleta de entrada, para la medición y control de caudal, el cual fue regulado mediante la compuerta de entrada al filtro. En Golondrinas, aunque tiene vertedero triangular, no se pudo controlar el caudal porque la válvula no está en buenas condiciones, en El Retiro no se tiene vertedero y en Arroyohondo la regla de aforo se instaló en el canal de entrada al floculador previo al FGAC, pues es allí donde está el vertedero.

Para medir la pérdida de carga, se utilizó una regla o metro. Para su instalación se lavó el filtro, y se cerró por completo la compuerta del canal que alimenta el filtro, se hizo una

marca del nivel del agua en la pared de la cámara de entrada y se ubicó el cero de la regla allí. Cuando el filtro trabajó normalmente se miró hasta que número llegó el nivel del agua y esta fue la pérdida de carga.

El caudal de operación de cada planta fue ajustado al caudal de diseño para garantizar la velocidad de filtración en los FGAC y se revisó que todas las unidades de tratamiento operaran con caudal fijado.

5.2.3 Caracterización de los medios filtrantes en las plantas estudiadas

Prueba de granulometría

Para el análisis granulométrico se tomó una muestra por cada capa de grava, la cual se llevó al horno donde se secó durante 12 horas a 100 °C y todos los grumos se disgregaron en partículas pequeñas. Una vez seca y fría se mezcló varias veces y se sacó una submuestra de 2.000g la cual se llevó a un vibrador de mallas durante 5 minutos en una serie de tamices con tamaño de abertura entre 2 y 37,5 mm. (Velásquez, 2001). Después de que la prueba de vibración concluyó, se determinó la masa de los granos retenidos en cada malla, expresada generalmente como porcentaje del peso total de la muestra (Juárez, 2004) y se procedió a realizar la curva granulométrica respectiva.

Porosidad de la grava

La porosidad se define como la razón del volumen representado por los poros y el volumen total del lecho filtrante, afectada por la esfericidad del grano; la porosidad se expresa en porcentaje. A las muestras de grava tomadas en cada planta se les calculó la porosidad con base en lo reportado en Ives (1990). Inicialmente se calculó la densidad del medio filtrante con base en los pasos especificados en la Tabla 4, presentada a continuación.

Tabla 4 Pasos para el cálculo de densidad del medio filtrante

PROCEDIMIENTO		
A	Pesar una botella de un volumen determinado vacía	(g)
B	Llenar la botella con agua y pesarla	(g)
C	Pesar la botella mas muestra seca	(g)
D	Pesar la botella con muestra seca y con volumen de agua	(g)
E	calcular el volumen de la botella (B-A)	(cm ³)
F	Calcular el peso de la muestra (C-A)	(g)
G	Calcular el volumen de agua con la muestra (C-A)	(cm ³)
H	Calcular el volumen ocupado por la muestra (E-G)	(cm ³)
I	calcular la densidad del material = masa/ volumen (F/H)	(g/cm ³)
Fuente: Ives (1990)		

Después de obtenida la densidad se procedió a calcular la porosidad mediante la ecuación 2

$$\epsilon = 1 - \frac{M}{\rho_o * V} = 1 - \frac{M}{\rho_o * V} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

ϵ = Porosidad

M= Masa de la muestra del medio filtrante (g)

ρ_o = Densidad del medio filtrante (g/cm³)

V=Volumen aparente del medio filtrante en la botella (cm³)

Factor de forma de la grava

El área superficial de los materiales granulares en contacto con el agua que pasa a través de un filtro, es una determinante tanto operacional como hidráulico (Fair *et al.*, 1984).

En un sistema de tratamiento la superficie de los granos son considerados como una suma de superficies, como si se tratara de una sola área de sedimentación conectada; es decir que la carga superficial (Caudal (Q)/área de depósito (A)), será extremadamente pequeña; es decir que la eficiencia de la sedimentación es una función de la relación entre la carga

superficial y la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión (Huisman y Wood, 1974).

Para hallar el área superficial es necesario, hallar la esfericidad de la partícula y conocer que tan esférica o angular es la grava. La esfericidad se calculó a partir de la escala de comparación visual presentada por Di Bernardo (1993) (Anexo B) y a partir de este dato se calculó la relación área superficial sobre volumen de lecho por la ecuación 3.

$$S = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\psi d} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

S= Área superficial total / volumen de lecho (m^2/m^3)

ε = Porosidad

ψ = Esfericidad del medio filtrante

d=diámetro de la grava (tamiz) (m)

5.3 Operación y mantenimiento de los FGAC

Para asegurar que la planta funcione adecuadamente a través del tiempo se deben efectuar correcta y oportunamente las acciones de operación y mantenimiento, para lo cual la entidad prestadora del servicio y los operarios deben estar muy bien capacitados.

5.3.1 Operación de los FGAC

En la Tabla 5 se presenta la guía de revisión de cada variable para cada planta durante el trabajo de campo.

Tabla 5 Guía de revisión de cada FGAC

Variable	Determinación	Comentario
Área de filtración(m ²)	Medición en campo y verificación con planos de construcción	Se comparó el área de cada modulo con los valores de área mínima establecidos en la literatura.
Número de unidades	Revisión en campo del número de líneas en paralelo y en serie	Se revisó la facilidad para operar y mantener y la flexibilidad en caso de alguna emergencia.
Caudal de operación (L/s)	Medición por el método volumétrico a través de los vertederos existentes	Se revisó el caudal de diseño contra el caudal de operación.
Velocidad de filtración (m/h)	Se determinó relacionando el caudal con el área de filtración	Se determinaron los rangos de operación en función del caudal de diseño
Tasa de lavado (m/h)	Se determinó mediante variaciones del nivel de agua en la superficie a través del tiempo y el área del filtro.	Se comparó la tasa de lavado de operación contra la establecida en las guías de diseño.
Tipo de control de caudal	Revisión de la existencia de canal de entrada, vertedero y regla de aforo de caudal	Se revisó la funcionalidad y el tipo de registro por el operador.
Tipo de control de pérdida de carga	Revisión de la existencia de cámara de control de entrada y regla de medición	Se determinó la pérdida de carga para lecho limpio, la duración de la carrera y el máximo nivel de pérdida de carga permitido.
Sistema de drenaje	Se revisó el tipo de sistema de drenaje considerando: longitud del tubo principal y lateral, numero de orificios y diámetro de las tuberías y del orificio	Se calculó la tasa de lavado y se comparó con la tasa de lavado de operación.
Altura del lecho filtrante (m)	Se midió el espesor de cada capa	Se comparó contra el valor establecido en el diseño.
Profundidad de la estructura (m)	Medición en campo	Se comparó con los planos de diseño.
Altura del lecho según diseño	Medición en campo	Se determinó la longitud total de lecho y se comparó con los valores recomendados en la literatura.

5.3.2 Mantenimiento de los FGA

El Filtro Grueso se debe limpiar por lo menos una vez a la semana, para evitar que se tape con los solidos y no deje pasar el agua (Vargas *et al.*, 1998). Una vez establecida la necesidad de limpieza de cada unidad se tomaron los tiempos de cada actividad en el lavado de los filtros para hacer una comparación entre plantas.

5.4 Eficiencia

5.4.1 Calidad de agua

El control de la calidad de agua afluente y efluente con los análisis físicos y microbiológicos, permitieron determinar las eficiencias en las unidades.

En la Tabla 6 se presentan los parámetros medidos, la frecuencia de medición de los parámetros de seguimiento y la técnica usada en los laboratorios del Instituto Cinara o en campo, según lo establecido en los Métodos Estándar para Análisis de Agua (APHA *et al.*, 1999).

En la Figura 7, se presenta el lugar donde es medido cada parámetro en el FGAC, relacionándolo con la numeración de la Tabla 6.

Tabla 6 Frecuencia de medición de parámetros

N°	Parámetro	Punto de control	Frecuencia	Técnica	Unidades a reportar
Calidad de agua					
1	Turbiedad	Entrada y salida del filtro	2 veces/ día	Nefelométrica	UNT
2	Color	Entrada y salida del filtro	2 veces/ día	Espectrofotométrica	UPC
3	Ph	Entrada y salida del filtro	2 veces/ día	Electromagnética	Unidades
4	E-coli	Entrada y salida del filtro	2 veces/ día	Filtración por membrana	UFC/100ml
5	Coliformes totales	Entrada y salida del filtro	2 veces/ día	Filtración por membrana	UFC/100ml
Otros parámetros					
6	Velocidad de filtración	Canaleta de entrada	2 veces/ día	Medición directa con regla de aforo	Cm
7	Pérdida de carga	Cámara de entrada filtro	2 veces/ día	Medición directa con regla	Cm
8	Tasa de lavado del filtro	Cámara de válvulas de lavado	2 veces	Aforo volumétrico	m/s
9	Granulometría	Compartimiento principal/ por cada capa	1 vez	Tamizado	mm
10	Prueba de trazadores	Compartimiento principal	1 vez	Electrolítica	μS/cm
11	Prueba de sedimentación en columna	Cámara de válvulas de lavado	1 vez	Sedimentación en columna	cm/min

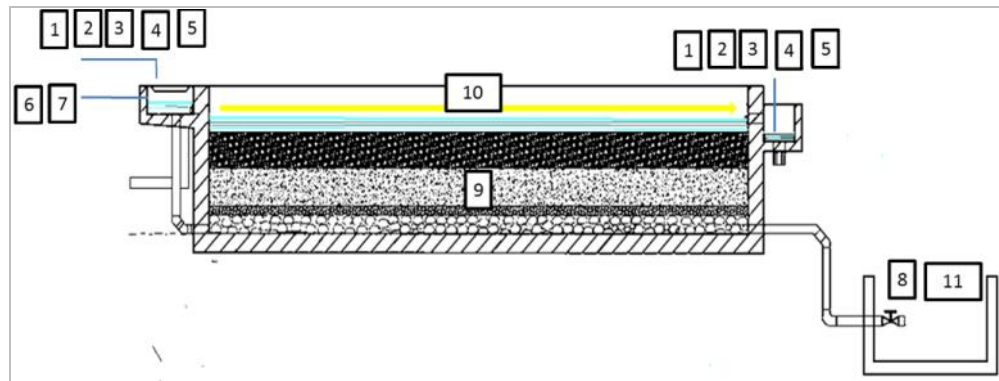


Figura 7 Parámetros de medición

5.4.2 Análisis Hidráulico de los FGAC (prueba de trazadores)

Mediante prueba de trazadores se analizó el comportamiento hidráulico en el compartimiento principal de los FGAC y se estimaron los tiempos de residencia. La prueba se efectuó aplicando la técnica de estímulo – respuesta, mediante la cual el estímulo es la inyección del trazador y la respuesta es la concentración de trazador medida en el flujo de salida, usando como trazador cloruro de sodio con una pureza del 99% y con una concentración de 100 mg/l. El trazador se dosificó en forma continua por medio de un dosificador de cabeza constante (Velásquez, 2001). La concentración a la salida se valoró a través de mediciones de conductividad eléctrica utilizando conductidímetro Marca= VWR, Modelo Sb70c, Serie DO5258 (Figura 8).



Figura 8 Medición de la conductividad en el filtro

Se calculó el tiempo teórico de retención (T_o) por medio de la Ecuación 4 y se determinó la cantidad de sal y el volumen de agua para preparar la salmuera, para obtener la concentración anteriormente mencionada y que alcance para dosificar al menos 3 veces el tiempo teórico.

$$T_o = \frac{V}{Q}$$

Ecuación (4)

Donde: V = volumen útil del filtro (teniendo en cuenta la porosidad del medio filtrante)

Q = caudal del filtro

Al medir y graficar la concentración del trazador a la salida en función del tiempo, se obtuvo una curva, cuya forma permite realizar un análisis del comportamiento hidrodinámico del reactor. Este análisis se realizó a través del modelo matemático simplificado de Wolf y Resnick, el cual permite comprender el comportamiento cuantitativo del sistema y predecir la hidráulica del FGAC; adicionalmente, este análisis puede ayudar en la descripción de la dinámica y las características de control del FGAC y en la estimación de los tiempos requeridos para alcanzar nuevos estados estables cuando se presenta alguna perturbación (Corredor y Caicedo, 2005).

5.4.3 Velocidad de sedimentación y diámetro de partículas en los filtros en grava

Para recolectar las muestras de agua que permitieron determinar la velocidad de sedimentación y diámetro de partículas en los FGAC se realizó la descarga hidráulica de los filtros, la cual consiste en llenar la unidad hasta un determinado nivel de agua y luego mediante el cierre de la válvula de entrada al filtro y la apertura de la válvula de lavado, dejar drenar la unidad (Florez *et al.*, 2002).

De cada filtro en gravas se tomó una muestra de agua de lavado de aproximadamente 5 galones. En el laboratorio esta muestra se introdujo a la columna de sedimentación (ver

Figura 9), para determinar la velocidad de sedimentación y estimar la distribución de los tamaños de las partículas. La sedimentación se dio en un lugar en condiciones de reposo.

A distintos intervalos de tiempo (según la variación de la turbiedad), se retiraron las muestras de los orificios y se midió la turbiedad de cada muestra, para luego hacer análisis de velocidad de sedimentación y estimar el tamaño de partícula.

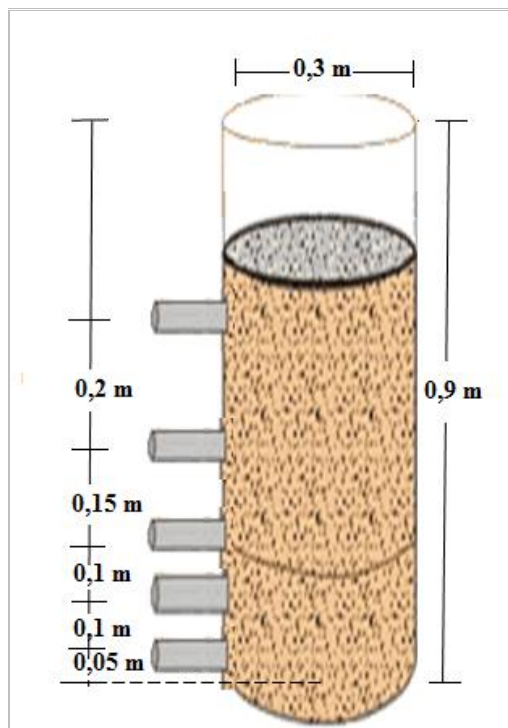


Figura 9 Columna de sedimentación (dimensiones)

5.5 Ajustes de operación y mantenimiento

5.5.1 Revisión hidráulica de las unidades FGAC

Para llevar a cabo la revisión hidráulica de los FGAC se hallaron las pérdidas en el sistema totales en los filtros de cada planta, según su actual diseño, luego se estimaron las pérdidas con los criterios de diseño establecidos en Galvis *et al.* (1999), seguido por una

comparación entre la distancia del nivel del agua hasta la válvula de lavado. Se hizo la descarga hidráulica del filtro posterior a los choques que consistieron básicamente en cierres y aperturas rápidas de la válvula de drenaje del filtro, se midió el caudal, llenando un volumen en un determinado tiempo y se multiplicó este caudal por el área del filtro y esto fue el valor de las tasas de lavado medidas en campo.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de responder a los objetivos planteados en la evaluación del sistema y de acuerdo con la metodología, los resultados se organizaron en tres partes correspondientes a i) Operación y mantenimiento de los FGAC. ii) Eficiencia del tratamiento. iii) Ajustes a la operación y mantenimiento.

6.1 Operación y Mantenimiento de los FGAC

6.1.1 Caracterización de medios filtrantes

Se hizo una caracterización de los medios filtrantes para verificar si lo diseñado esta acorde con lo construido, ya que los medios filtrantes son fundamentales para la práctica de la filtración y su elección es, habitualmente, la consideración más importante para garantizar el funcionamiento del proceso debido a que ayuda a optimizar tanto el funcionamiento hidráulico como el mantenimiento de las unidades (Galvis *et al.*, 1999).

Después de clasificar las gravas en cada filtro y hacerles las respectivas pruebas de granulometría, se definieron los tamaños según las gráficas mostradas en el Anexo C. A continuación se presentan en la Tabla 7, los tamaños de las gravas en cada capa del filtro comparados con los tamaños recomendados en diseño.

Tabla 7 Tamaño de grava

	El Retiro	La Sirena	Arroyohondo	Golondrinas	Diseño (Galvis <i>et al.</i> , 1999)
Capa 1 (mm)	24-28	38	19-32	-	19-25
Capa 2 (mm)	10-14	10-15	13-19	-	13-19
Capa 3 (mm)	4-8	4-8	9.5-13	6-8	6-13
Capa 4 (mm)	-	-	6.35-9.5	2-4	3-6
Capa 5 (mm)	-	-	-	1.8-3	1.6-3

Según las recomendaciones para lecho filtrante presentadas en Galvis *et al.* (1999), se pudo observar que en general las plantas no cumplen con el rango recomendado en cada capa, sin embargo las profundidades (tabla 9) si están dentro de rango recomendado por Galvis que es de 0,9 a 1,2 m, todo esto teniendo en cuenta que la profundidad del lecho filtrante depende del riesgo sanitario asociado con la calidad de agua cruda que cada planta maneja. Por ejemplo, en Golondrinas se pusieron 5 capas de grava para mejorar la eficiencia de remoción de sólidos.

La porosidad del medio filtrante, fue hallada para poder calcular el volumen útil de los filtros, en la Tabla 8 se muestran dichos resultados, junto con la esfericidad y área superficial de la capa de cada grano de grava.

Tabla 8 Caracterización del medio filtrante

		El Retiro	La Sirena	Arroyohondo	Golondrinas
Capa 1	Porosidad (%)	0,44	0,55	0,31	
	Tamaño (mm)	24-28	38	19-32	
	Esfericidad	0,89	0,7	0,85	
	Área superficial de la capa de grano (m ²)	145	102	191	
Capa 2	Porosidad (%)	0,46	0,56	0,38	
	Tamaño (mm)	10.-14	10.-15	13-19	
	Esfericidad	0,89	0,7	0,85	
	Área superficial de la capa de grano (m ²)	303	302	274	
Capa 3	Porosidad (%)	0,44	0,54	0,4	0,43
	Tamaño (mm)	4.-8	4.-8	9.5-13	6
	Esfericidad	0,89	0,7	0,85	0,87
	Área superficial de la capa de grano (m ²)	629	657	385	655
Capa 4	Porosidad (%)			0,42	0,43
	Tamaño (mm)			6.35-9.5	4
	Esfericidad			0,85	0,87
	Área superficial de la capa de grano (m ²)			512	983
Capa 5	Porosidad (%)				0,42
	Tamaño (mm)				2
	Esfericidad				0,87
	Área superficial de la capa de grano (m ²)				2000

En la planta de La Sirena los FGAC presentan gravas derivadas del proceso de trituración de rocas calizas, las cuales presentan mayor porosidad que las gravas de las otras plantas

que son de canto rodado. A medida que aumenta el tamaño de la grava, según Ives (1990), debe disminuir la porosidad, esta tendencia se observó básicamente en los lechos del FGAC de Arroyohondo, en las demás plantas no se apreciaron variaciones considerables entre la porosidad de los lechos. Cuando las gravas son de menor tamaño, tienen la capacidad de almacenar mayor volumen de agua en los intersticios. En cuanto al área superficial, se pudo observar que esta se incrementa cuando el tamaño del medio filtrante y la esfericidad se hacen menores. Según Wegelin *et al.* (1997), la grava en cada capa debe ser lo mas uniforme posible para garantizar una buena porosidad.

6.1.2 Operación

En la Tabla 9 se resumen los criterios con los que fueron diseñados los FGAC en cada planta comparándolos con los de operación.

Tabla 9 Criterios de diseño y operación en los FGAC

Característica	Unidad	FGAC			
		Arroyohondo	Retiro	Sirena	Golondrinas
# Unidades	-	2	4	3	2
Año de construcción de la planta	Año	2003	1987	1989	2003
Años de operación de los FGAC	Años	9	1*	15**	9
Caudal de diseño de la planta	L/s	6	20	9,6	9
Velocidad de filtración (diseño)	m/h	0,45-0,90	0,64	0,65	0,7
Velocidad de filtración (operación)	m/h	0,45- 0,9	0,64	1,02	0,57
Altura de sobrenadante de agua	M	0,05	0,02	0,05	0,1
Ancho	M	2,8	4	5,9	4,2
Largo	M	4,3	7	3	5,5
Área superficial	m ²	12,1	28,0	17,7	23,1
Caudal diseño por unidad	L/s	1,5-3	5	3,2	4,5
Caudal operación por unidad	L/s	1,5-3	5	5,03	3,63
h total lecho	M	1,05	1,6	1,1	1,05
# capas grava	-	4	3	3	4
h capa 1-inf. (Ø grava: 19 - 25 mm)	M	0,25	0,2	0,3	-
h capa 2 (Ø grava: 13 - 19 mm)	M	0,25	0,1	0,4	0,35
h capa 3 (Ø grava: 6- 13mm)	M	0,25	0,8	0,4	0,2
h capa 4 (Ø grava: 3 - 6 mm)	M	0,3	-	-	0,3
h capa 5 (Ø grava: 1.6 - 3 mm)	M	-	-	-	0,2
h grava-sop. (Ø grava: 10- 20 cm)	M	-	0,5	-	-

*Nuevos filtros construidos en Marzo de 2011 para mayor caudal de diseño. La altura de lecho es variable porque el fondo tiene pendiente de 3,5% hacia la válvula de lavado y la altura del lecho crece en ese sentido.

**La construcción de los FGAC se hizo en el año 1997.

Según la Tabla 9, se puede identificar que el caudal actual de operación en la Sirena es mayor que el caudal con que fueron diseñados los filtros, esto implica mayor velocidad de filtración, menos tiempo de retención y el filtro trabaja con mayor caudal que el recomendado en diseño, con una sobre carga del 57% que es mayor al 20% que es lo máximo permisible según Galvis *et al.* (1999). En Golondrinas los filtros trabajan con 19.3% menos que el caudal de diseño. La planta de Arroyohondo trabaja con dos velocidades de filtración. La mayor velocidad es el doble que la menor, esto se debe a que el sistema esta diseñado para operar con y sin coagulante dependiendo de la calidad de la fuente y también por la demanda de agua de los usuarios, que dependiendo de la época del año genera mayor consumo de agua.

El FGAC se debe lavar cuando alcance su máximo nivel de pérdida de carga o cuando el filtro deteriore la calidad del agua en el efluente. Las pérdidas de carga medidas en cada planta son presentadas en la Tabla 10.

Tabla 10 Pérdidas de carga en las plantas

Planta	Lectura inicial (cm)	Lectura final (cm)	Pérdida de carga (cm)	Tiempo de la carrera (días)
Sirena	13	20	7	95
Arroyohondo	3,5	5,5	1	7
Golondrinas	1	3	2	7
Retiro	1	2	1	7

El filtro de La Sirena se operó durante 95 días para evaluar el tiempo en el cual lograba obtener el máximo nivel de pérdida de carga; sin embargo esto no se pudo lograr, lo cual indica que el filtro tiene un lento proceso de acumulación de solidos en el medio filtrante. En Arroyohondo y en Golondrinas, se pudo observar que el nivel de agua no varía de gran manera en la cámara de entrada con respecto al tiempo. Vargas *et al.* (1998). sugiere lavados semanales, criterio que puede ser revisado a la luz de estos resultados en las cuatro plantas, pues la perdida de carga no crece de manera acelerada; al respecto Ahsan 1995 menciona que la limpieza del filtro se hace necesaria cuando la resistencia del agua alcanza un valor máximo; mientras que, Sabogal, 2009, sugiere lavados intensos al final de la

carrera de filtración o mensualmente. Los resultados indican que las plantas se están lavando superficialmente e hidráulicamente en lapsos de tiempos muy cortos, pudiendo afectarla eficiencia de remoción de sólidos o generar rompimiento de ellos en pedazos mas pequeños debido a la limpieza manual, quitándoles la propiedad de conservar una menor porosidad (Wegelin *et al.*, 1997).

En Golondrinas el cero de la regla de perdida de carga , es decir el nivel de agua en la cámara de entrada, esta por debajo de la cámara indicando que la cámara de entrada se hizo a un nivel mucho menor al recomendado en diseño, esto puede ser explicado por un limitado control durante el proceso constructivo. En El Retiro la pérdida de carga fue muy pequeña (menor a 1 en 7 días) lo cual se explica porque el agua previamente ha sido sedimentada en el reservorio y las partículas grandes han tenido tiempo de sedimentarse en esa unidad.

6.1.3 Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento en las diferentes plantas se muestran en la Tabla 11.

Analizando las actividades en cada planta se puede afirmar que en todas se ha llevado una frecuencia para el mantenimiento de la unidad (cada semana), frecuencia que debe ser evaluada según los resultados de este trabajo, los operarios han contado con capacitación adecuada, las herramientas de trabajo han sido adecuadas; sin embargo uno de los más grandes problemas es el diseño del lavado superficial para los filtros en La Sirena y Golondrinas, ya que el agua sale por dos orificios que impiden una rápida evacuación, esto hace que las partículas se sedimenten de nuevo, disminuyendo la eficiencia de limpieza en los filtros. Las plantas que cuentan con canales para facilitar la salida del agua de lavado superficial como El Retiro y Arroyohondo, demandan menos tiempo para la limpieza del filtro y el medio filtrante queda más limpio.

Tabla 11 Tiempo en minutos de actividades de mantenimiento

Actividad	Golondrinas	Retiro	Sirena	Arroyohondo
	Tiempo (min)			
Cierre de Entrada y Salida	1	1	1	1
1° Lavado superficial removiendo grava con pala	9	5	6	2,23
1° limpieza superficial con escoba	8	9	17,25	4,51
2° Lavado superficial removiendo grava con pala	20	-	-	-
2° limpieza superficial con escoba	23	-	-	-
Lavado con apertura rápida de válvula (choques)	0,5	1,3	1	0,8
Vaciado parcial del filtro	15	-	-	-
Raspado de la grava superficial con pala	10	-	-	-
Llenado	15	-	-	-
2° Lavado con apertura rápida de válvula	0,4	-	-	-
Vaciado total del filtro	10	4,4	2,9	5
Nivelación de la grava con escoba	10	6,2	4,75	1,42
limpieza superficial		-	-	5,9
Llenado total	20	30	25	15
Tiempo total (min)	141,86	56,85	57,9	35,89
Horas*Hombre/m²	0,10	0,04	0,07	0,05

Tabla 12 Observaciones de O&M

FGAC	Observaciones
Arroyohondo	• Para optimizar la salida del agua superficial hacen una rampa con la grava. • La limpieza de las paredes la hacen con solución de hipoclorito de sodio. • Tiene canal frontal para facilitar la limpieza superficial del filtro.
El Retiro	• Tienen canaletas laterales para facilitar la limpieza superficial del filtro. • La entrada de agua es por un tubo al cual le ponen un tapón para impedir entrada de aire, pero el burbujeo es permanente en la unidad.
La Sirena	• La salida de agua de lavado superficial es por dos orificios los cuales impiden que el agua salga rápido, haciendo que se sedimenten de nuevo las partículas que fueron removidas. • Pérdida de tiempo para el operario por la poca eficiencia de la salida de agua al lavar superficialmente el filtro.
Golondrinas	• La salida de agua de lavado superficial es por dos orificios los cuales impiden que el agua salga rápido, haciendo que se sedimenten de nuevo las partículas que fueron removidas. • Pérdida de tiempo para el operario por la poca eficiencia de la salida de agua superficial al lavar el filtro. • Desperdicio de agua porque repiten el procedimiento de limpieza. • Represamiento en la cámara de válvula de lavado, perdiendo eficiencia del lavado de fondo y se incrementa el tiempo de mantenimiento. • Válvulas de control deficientes para el control de caudal a la entrada

La Figura 10 ilustra la diferencia entre lavado con canaletas laterales y orificio para la salida del agua. Se puede observar que con canaletas de salida el filtro se vacía mas rápidamente, mientras que al salir por el orificio las partículas no salen a tiempo y se vuelven a depositar en la superficie del lecho.



Canaletas (izquierda) y orificios (derecha) de salida de agua

Figura 10 Diferencias en la salida de agua de lavado de los FGAC

6.1.4 Costos

Las empresas prestadoras del servicio de acueducto en Colombia han implementado manejos financieros con el propósito de asegurar la calidad y sostenibilidad del servicio a largo plazo (Cadavid, 2008). En la Tabla 13 se presenta el costo en pesos colombianos del metro cúbico de agua potable producido en cada planta; esto hace referencia a los costos totales anuales comparado con el total de agua producida al año. En Arroyohondo hay un sistema de bombeo para aducción y conducción del agua, lo que aumenta los costos de electricidad, además de pagar para realizar los análisis de agua. En El Retiro, los costos de personal son altos debido a que cuenta con un mayor número de empleados. Esta planta cuenta con su propio laboratorio de análisis de aguas, lo cual requiere también el pago de personal. Adicionalmente, los costos de servicios públicos son altos por pertenecer a un estrato socio-económico alto. Estos factores contribuyen a que el costo de operación sea mayor comparados con el costo de operación Golondrinas y La Sirena, las cuales están ubicadas en menor estrato social, y no cuentan con análisis de agua para el control de calidad, ni hacen contratos a terceros.

Tabla 13 Costo por metro cúbico en las plantas (2010)

COSTOS (\$)	Golondrinas	El Retiro	La Sirena	Arroyohondo
Sueldos	10.687.235	43.122.321	19.546.550	18.060.000
Prestaciones sociales	8.441.496	10.229.060	11.549.138	8.868.000
Dotación		753.235		456.000
Servicios Públicos	1.673.000	7.178.268	8.396.081	44.688.000
Depreciación		15.874.666		
Honorarios		2.094.000		
Mantenimientos		14.325.550	23.178.546	9.720.000
Análisis de calidad de agua		5.795.564		3.408.000
Operario de laboratorio		8.976.000		
Control de calidad			822.788	
Aportes – Donaciones	1.965.744	15.239.594	11.969.509	2.628.000
Transportes de materiales		1.630.000	719.100	540.000
Materiales y suministros			9.115.747	960.000
Estudios y proyectos			2.475.700	
Arrendamiento			2.400.000	
Servicios contables		4.694.949		
Gatos de representación		2.818.000	268.773	
Gastos de asociación			1.000.000	
Gastos viajes			693.700	
Gastos bancarios		5.362.631	14.000	
Servicios de facturación		2.662.000	286.000	
Otros costos		1.340.477	7.880.826	916.000
TOTAL COSTOS (\$)	22.767.475	142.096.315	100.316.458	90.244.000
Cantidad de agua producida (m ³ /año)	341522	630720	364290*	189216
\$/m³	67	225	275	477

*Teniendo en cuenta que la planta trabaja con una sobrecarga del 57%

Fuente: Juntas administradoras de las plantas estudiadas

Los costos presentados en la Tabla 13, son calculados teniendo en cuenta los caudales de operación. Los resultados indican que los costos de personal son los más elevados, exceptuando Arroyohondo en donde se manejan costos de servicios públicos altos asociados a consumo de energía para el bombeo del agua a la planta, el cual representa el 99,3% del total de pago por servicios públicos. Se debe tener en cuenta que todos los sistemas de acueducto están comprometidos a realizar esfuerzos para disminuir al máximo las pérdidas técnicas pues el nivel máximo de agua no contabilizada que se acepta para el cálculo de los costos de la prestación del servicio de acueducto es del 30%. (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). A demás hay que considerar también entre el 3% y 5% del

caudal medio diario puede ser empleado para atender las necesidades de lavado en la planta.

El ítem de aportes y donaciones corresponde a pagos o aportes legales, para garantizar la Salud, la pensión de los empleados y que estén protegidos de cualquier accidente de trabajo con la ARP. Los parafiscales (Caja, Sena, ICBF) son para el bienestar del empleado y la comunidad.

6.2 Eficiencia en los FGAC

6.2.1 Calidad de agua

Las unidades de tratamiento se alimentaron con aguas de los ríos Arroyohondo (planta Arroyohondo), Pance (planta El Retiro), Meléndez, Epaminonda (planta La Sirena) y la quebrada el Chocho (Planta Golondrinas). Los valores de cada parámetro están en el Anexo D y el desempeño de los sistemas de tratamiento en la remoción de turbiedad se presenta en la Tabla 14.

El parámetro de *turbiedad* para la salida de los FGAC se encontró dentro de un rango de 0,54 a 4,95 UNT, indicando que el efluente cumple con el valor máximo admisible que es 5-10 UNT según Galvis *et al.* (1999), para que el FLA trabaje en óptimas condiciones. En la literatura la mayoría de trabajos científicos reportan baja eficiencia de los FLA en la remoción de turbiedad, limitando este parámetro a un efluente de 10 UNT en los FGAC (Di Bernardo y Sabogal Paz, 2008). Se puede afirmar que el rango de turbiedad a la salida de los FGAC cumple con lo establecido en la literatura para la operación de los FLA. Los valores de *Color* real que se encontraron a la salida de los filtros fueron de 1,28 a 40,92 UPC, lo cual muestra que se maneja un rango bastante alto con valores mayores a 25 UPC que es el valor máximo permisible para color en el afluente del FLA, según Galvis *et al.* (1999). El *pH*, en La Sirena, Golondrinas y El Retiro se encontró entre 7,26 y 9,05 unidades, que son valores permisibles para agua a potabilizar; mientras que en

Arroyohondo presentó en la salida un valor máximo de 9,05, cercano al máximo permitido en el decreto 2115 de 2007 (MPS y MAVDT, 2007).

Tabla 14 Calidad de agua cruda y efluente FGAC

Parámetro	Planta	Punto	Rango	D.E. (±)	Media	N
Parámetros Físicos						
Turbiedad (UNT)	Retiro	Entrada	0,98-11,8	3,16	3,17	21
		Salida	0,72-4,7	1	1,49	21
	Arroyohondo	Entrada	0,23-4,95	1,3	2,1	12
		Salida	0,54-2,95	0,74	1,6	12
	Golondrinas	Entrada	3,2 -11,1	2,56	5,22	14
		Salida	0,9 -3,13	1,19	3,62	14
	Sirena	Entrada	1,07-2,86	0,58	1,73	12
		Salida	0,95 -2,28	0,41	1,45	12
Color (UPC)	Retiro	Entrada	10,93 -60,21	14,33	27,63	21
		Salida	8,79 -40,92	9,77	18,96	21
	Arroyohondo	Entrada	1,64-20,92	7,5	15,21	12
		Salida	1,28-20,93	5,55	9,85	12
	Sirena	Entrada	8,07 -25	6,6	15,4	12
		Salida	8,07 -23,79	5,6	14,65	12
pH (Und)	Retiro	Entrada	7,16-8,10	0,24	7,55	21
		Salida	7,26-7,78	0,16	7,46	21
	Arroyohondo	Entrada	7,4-9,26	0,45	8,25	12
		Salida	7,71-9,05	0,37	8,19	12
	Golondrinas	Entrada	8,15-8,42	0,07	8,28	14
		Salida	8,22-8,41	0,07	8,32	14
	Sirena	Entrada	7,26 -7,7	0,11	7,47	12
		Salida	7,48-7,93	0,14	7,67	12
Parámetros microbiológicos						
Coliformes Totales (Log10 UFC/100ml)	Retiro	Entrada	3,2-4,26	0,19	3,89	21
		Salida	2,4-3,9	0,3	3,61	21
	Arroyohondo	Entrada	3,23-5,26	0,46	4,18	12
		Salida	3,61-5,56	0,53	4,09	12
	Golondrinas	Entrada	1,78-3,7	0,50	2,97	14
		Salida	2- 3,48	0,49	2,81	14
	Sirena	Entrada	3,2-3,46	0,10	3,24	12
		Salida	3,1 -3,42	0,26	3,23	12
E-coli (Log10 UFC/100ml)	Retiro	Entrada	1,9-3,26	0,41	2,70	21
		Salida	1,3-2,95	0,5	2,23	21
	Arroyohondo	Entrada	0-3,56	1,01	2,93	12
		Salida	0-3,83	0,96	2,90	12
	Golondrinas	Entrada	0,9 -2,23	0,36	1,83	14
		Salida	0-2	0,59	1,57	14
	Sirena	Entrada	1,85-2,26	0,34	2,09	12
		Salida	1,7-2,74	0,23	2,21	12

D.E.: Desviación estándar

N: número de muestras

Las fuentes presentaron alto riesgo microbiológico en términos de *Coliformes totales* y de *E. Coli*, siendo menor la contaminación en Sirena y Golondrinas, mientras que en la Arroyohondo y el Retiro fue un poco más alta debido a que sus fuentes son ríos que hacen parte de un sector turístico (sector Dapa y sector Pance respectivamente) y de actividad minera. Los valores de los parámetros antes mencionados en su gran mayoría cumplen con los valores máximos permisibles a ser tratados por el FLA, pues el agua que llega a esta unidad debe tener la mejor calidad posible para trabajar en óptimas condiciones (Galvis *et al.*, 1999).

6.2.2 Eficiencias de remoción según las velocidades de filtración

Se analizó la influencia de las velocidades de filtración con las que son operados los FGAC en función de las remociones obtenidas en cada filtro. En las Figura 11-14 se muestran, en su orden, los valores de remoción de Turbiedad, Color, Coliformes totales y E- coli, asociados a los percentiles de cada parámetro en cada uno de los filtros evaluados. En las figuras se especifica la velocidad de filtración en m/h al lado del nombre de cada planta.

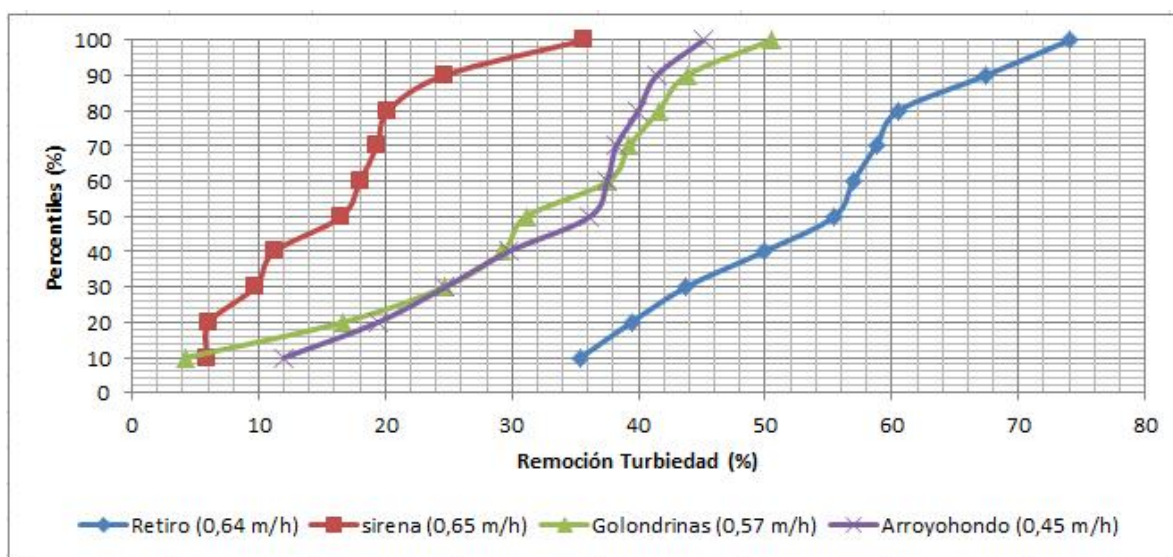


Figura 11 Remoción turbiedad

La planta de mejor desempeño en la remoción de turbiedad fue la de El Retiro $P_{50} < 56\%$, mientras que Golondrinas y Arroyohondo se comportaron muy parecidamente con P_{50} entre el 32% y el 36% respectivamente, y la planta de la Sirena muestra el más pobre desempeño en la remoción de turbiedad con $P_{50} < 18\%$, este hecho puede ser atribuido al tipo de material filtrante utilizado que mostró mayor porosidad inicial y menor esfericidad. En el caso de la turbiedad Galvis *et al.* (1999); propone unas reducciones típicas del 50 a 80% de remoción de turbiedad, teniendo en cuenta que esta aguas han sido tratadas previamente por unidades de FGDi, cumpliendo con la velocidad de filtración de diseño (0,3 m/h -0,75 m/h) y con lechos filtrantes 1 a 1.55 m. Wegelin *et al.* (1997) propone remoción del 87% para los FGAC con grava como material filtrante. En el caso de las 4 plantas estudiadas se puede observar la mediana, es decir, el 50 % de los datos están por debajo de remociones entre el 15% y 56%, que muestra que no hay remociones tan altas porque el agua de la fuente no fue tan turbia y esto implica menos remoción de partículas.

La Figura 13 indica que la planta de mejor desempeño en la remoción de color fue la de Arroyohondo $P_{50} < 40\%$, seguida por El Retiro con $P_{50} < 34\%$, mientras que la sirena mostro el más bajo desempeño con $P_{50} < 8\%$. La reducción típica según Galvis *et al.* (1999), es del 20 al 50%; por lo tanto se puede afirmar que hay buena remoción de este parámetro en los filtros estudiados en cada planta, menos en La Sirena, por problemas anteriormente mencionados. En Golondrinas no se pudo hacer la medición de color verdadero por limitaciones para el transporte diario de la muestra al laboratorio.

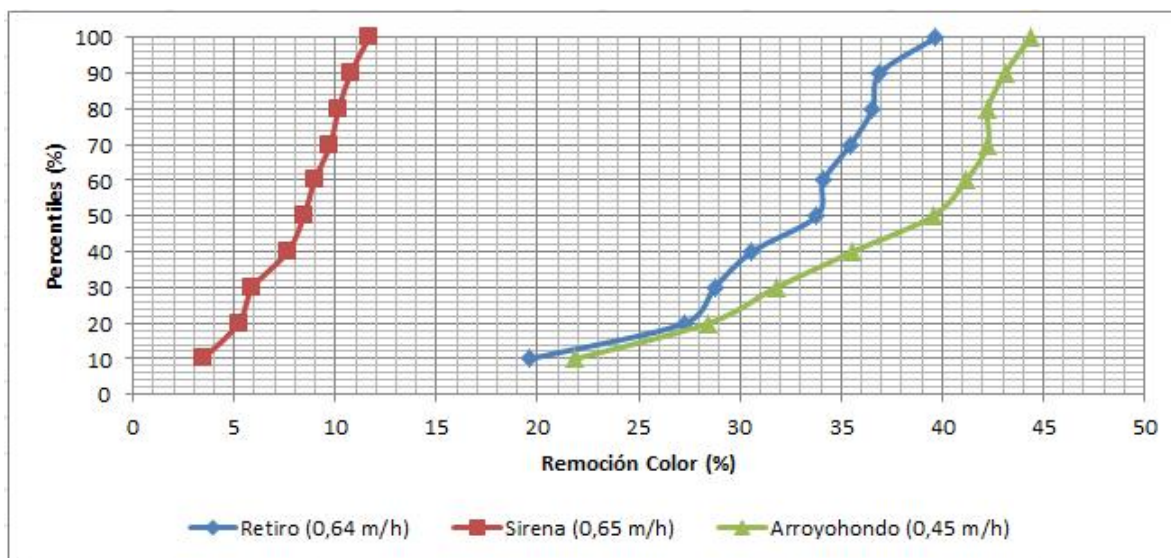


Figura 12 Remoción Color

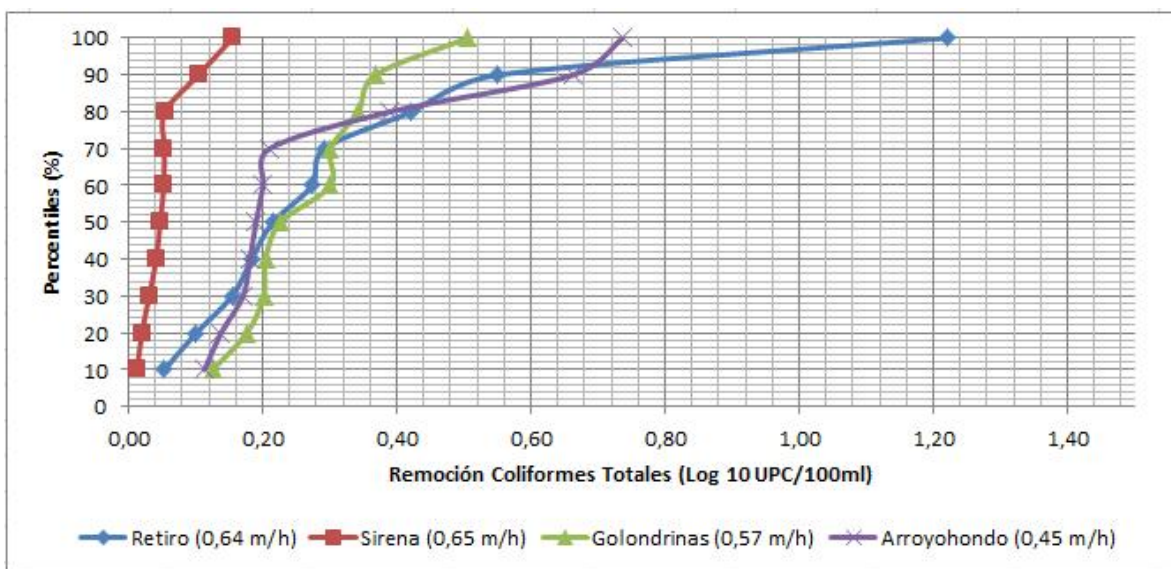


Figura 13 Remoción de Coliformes totales

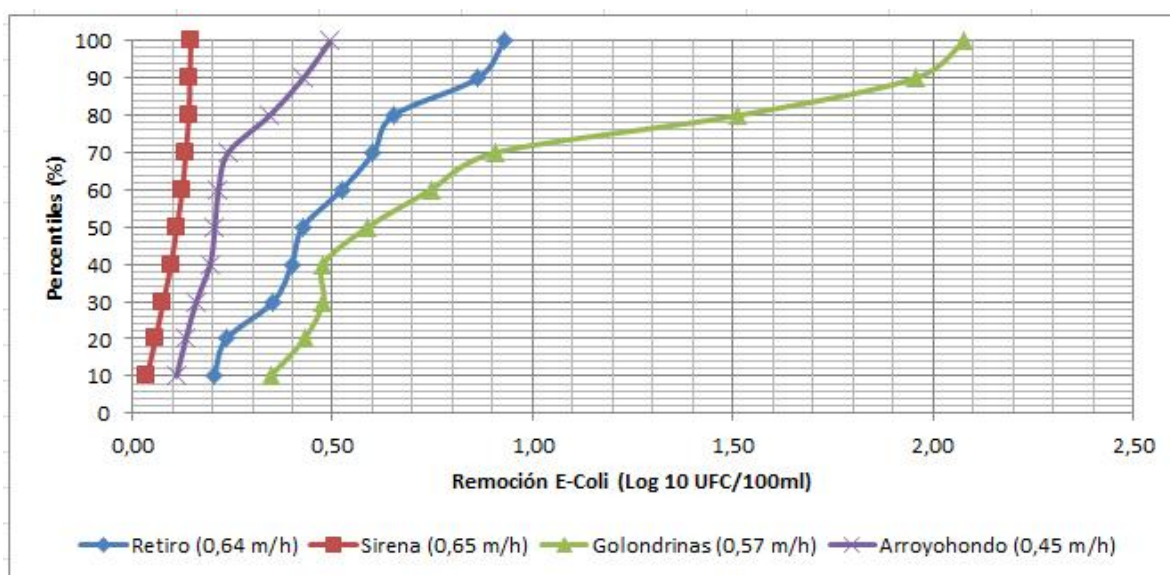


Figura 14 Remoción de E-coli

Es importante resaltar en el análisis microbiológico al comparar los FGAC de las plantas se encontró mayor eficiencia remocional en el Retiro esto puede ser atribuido a que presenta mayor volumen de lecho filtrante. En el caso de Golondrinas ésta también presenta una eficiencia remocional bastante alta a pesar de no presentar un alto contenido de contaminación, esto puede ser atribuido a que su última capa es de gravilla fina y tiene mayor número de capas, permitiendo una mayor retención de partículas. La reducción típica de Coliformes fecales, según Galvis *et al.* (1999), está entre 0,65 y 2,5 unidades logarítmicas (log) para FGAC, mientras que la (WHO, 2011) sugiere reducciones para E – Coli y Coliformes totales en filtro de grava entre 0,2-2,0 logs. La planta de mejor desempeño en la remoción de *e-coli* fue Golondrinas con $P_{50} < 0,6$ log, seguido por el Retiro con $P_{50} < 0,51$ y los FGAC con mas pobre desempeño fueron Arroyohondo y la Sirena con $P_{50} < 0,2$ y $0,1$ log respectivamente.

Los filtros de grava de flujo ascendente menos eficientes fueron los de la Sirena, hay que tener en cuenta que en este seguimiento de parámetros ya se había controlado la velocidad de filtración, para que quedara con el valor de diseño. El hecho que puede marcar la diferencia es que en esta planta se utiliza grava triturada como medio filtrante, con gravas

menos redondeadas y de mayor porosidad, esa mayor porosidad puede generar menos eficiencia, por la mayor probabilidad del traspase de partículas, sin embargo estas gravas tienen una forma angular con menor esfericidad que tiene mayor superficie comparada con las gravas esféricas. Otro factor que puede afectar la eficiencia de remoción son las continuas sobre cargas de caudal, que no facilita una adecuada maduración, lo que tiende a disminuir la remoción de todos los parámetros.

6.2.3 Seguimiento de turbiedad en la Sirena

En la Sirena se manejan turbiedades relativamente bajas de agua cruda. En la mañana se presenta turbiedades un poco mas altas debido al las ocasionales lluvias nocturnas. En la Tabla 15 se presenta la remoción de turbiedad según datos obtenidos durante 95 días (14 semanas) sin lavar el filtro.

En las dos primeras el filtro funcionó con una velocidad operación de 1.02 m/h la cual fue fijada por el operador en ese momento y fue superior la velocidad de diseño, ocasionando baja remoción de turbiedad. En la tercera semana el filtro operó con su velocidad de diseño y se dejo durante 12 semanas más sin lavar. En la Figura 15 se muestra la remoción de turbiedad en la sirena en las diferentes semanas.

Tabla 15 Remoción de turbiedad Sirena

Parámetro	Planta	# semana	Velocidad de filtración (m/h)	Estado del filtro	Remoción (%)		
					Percentil 90	Mediana	D.E (±)
Turbiedad UNT	Sirena	1 y 2	1,02	Limpio	24,63	14,8	9,77
		3 y 4	0,65	Limpio	56,01	20,2	24,23
		5 – 14	0,65	Sucio	38,85	19,3	17,93

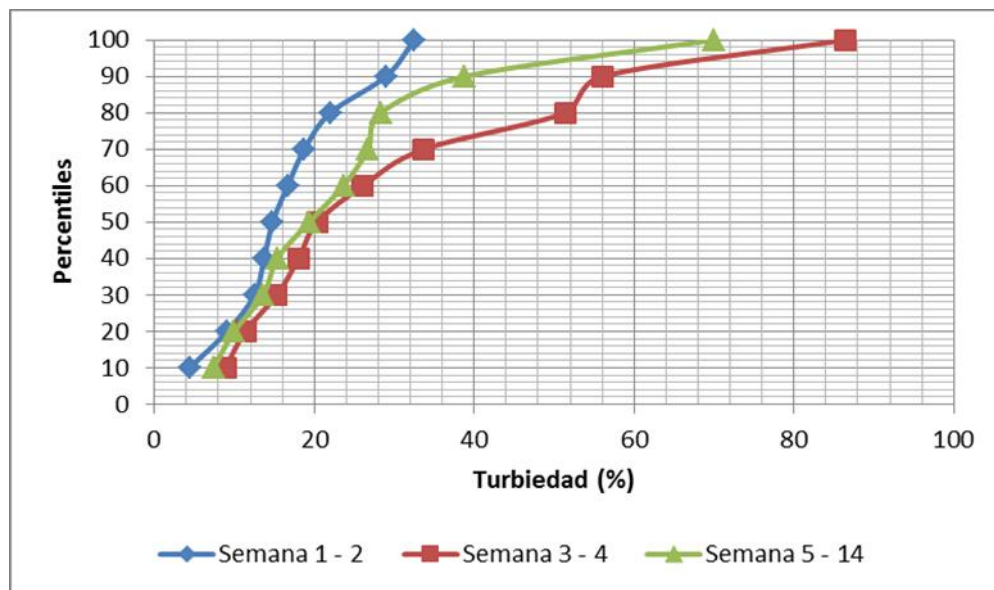


Figura 15 Remoción de turbiedad en la Sirena

Las semanas en la que hubo mejor desempeño en la remoción de turbiedad fueron las semanas 3-4 con un $P_{50} < 20\%$, donde la velocidad de filtración correspondió a la de diseño y el filtro aun seguía limpio, muy parecido fue el comportamiento en las semanas de la 5 a la 14 con igual velocidad de filtración y un $P_{50} < 19\%$ aunque al final estuvo completamente saturado de algas, partículas y lodo, la remoción no bajó, pero tampoco se incrementó, también se pudo observar que las semanas con mas bajo desempeño en la remoción de turbiedad fueron la 1 y 2 con un $P_{50} < 15\%$ aunque el filtro se encontraba totalmente limpio, este hecho puede ser atribuido a que el filtro estaba trabajando con sobre carga con una velocidad mayor que la de diseño, incluso mayor que lo recomendado en la literatura que es de 0,3 a 0,6 m/h según Galvis *et al.* (1999). Este seguimiento indica, que cuando hay sobre carga es decir que manejan mayor caudal que el rango en el que puede estar (+ 20% al caudal de diseño), afecta la eficiencia de remoción de la turbiedad. Un mayor lapso de tiempo de operación del filtro favorece la remoción de turbiedad, por lo tanto el criterio de limpieza semanal se puede revisar, al parecer la limpieza del filtro se puede extender entre 4 semanas, pero más investigación se requiere para observar que pasa con la remoción de microorganismos.

Lograr un pico de turbiedad no fue nada sencillo y requirió de paciencia y disponibilidad para obtener el dato. El pico de turbiedad que se presentó en la Sirena se muestra en la Figura 16.

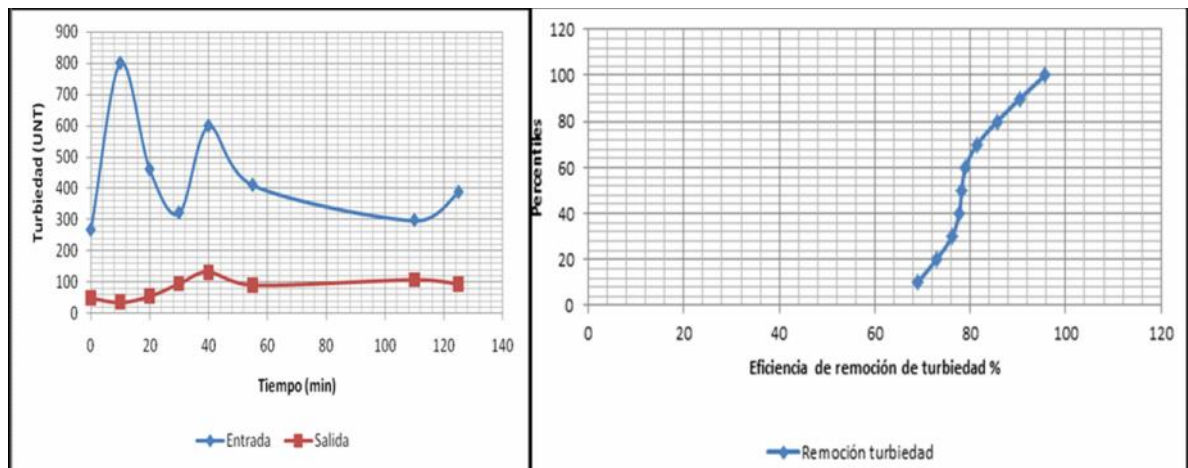


Figura 16 Pico de turbiedad – Sirena

Este pico de turbiedad se registró el 9 de Noviembre de 2010 al presentarse una lluvia intensa, la cual aumentó abruptamente la turbiedad y los sólidos suspendidos en la fuente que abastece la planta. Se pudo observar que el filtro amortiguó muy bien este pico con una eficiencia de remoción entre el 68 y el 95%, cumpliendo su función de remover los solidos en las diferentes capas de grava. La eficiencia media de remoción fue del 78%, se espera que en la segunda etapa de filtración en grava se remueva otro tanto, pero la calidad del efluente no es adecuada para la operación del filtro lento en arena, por lo que el operador no permite el ingreso de estos picos de turbiedad al sistema. Este seguimiento revela también que al aumentar la turbiedad hasta cierto rango, se mejora la eficiencia del filtro.

6.2.4 Comportamiento hidráulico de los FGAC

En la Tabla 16 se presentan las características de cada uno de los filtros y los parámetros utilizados para cada uno de los ensayos realizados. Para hallar el volumen útil se considera

la porosidad del medio filtrante y para hallar el tiempo teórico de retención en el filtro se usa la Ecuación 3.

Tabla 16 Características de los FGAC para analizar comportamiento hidráulico

Planta	Caudal de Ensayo (l/s)	Velocidad de filtración (m/h)	Conductividad máxima ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Área del filtro (m^2)	Altura de medio filtrante (m)	Volumen del filtro (m^3)	Volumen Útil del filtro (m^3)	Tiempo Teórico retención (min.)
Arroyohondo	6,0	1,00	185	12,1	1,05	12,7	5,08	38
	3,0	0,45	80	12,1	1,05	12,7	5,08	65
La Sirena	5,0	1,00	927	17,7	1,1	19,5	7,79	105
	3,0	0,65	292	17,7	1,1	19,5	7,79	100
	2,0	0,37	360	17,7	1,1	19,5	7,79	50
El Retiro	5,0	0,64	237	28	1,2	33,6	13,44	100
Golondrinas	3,6	0,57	95	23,1	1,05	24,3	9,70	60

Modelo simplificado de Wolf y Resnick.

En la Tabla 17 se presentan los resultados del modelo matemático de Wolf-Resnik para los FGAC de cada planta operados con la velocidad indicada. Se puede determinar que los FGAC presentaron un comportamiento hidráulico de flujo dual, el flujo que predomina en los filtros es de mezcla completa. Las zonas muertas que nos dan como resultado del estudio hidrodinámico es posible que se deban a acumulación del trazador en algún medio filtrate por lodos o sedimentos.

Tabla 17 Resultados del modelo Wolf- Resnik en cada FGAC por planta

	Golondrinas	Sirena			Arroyohondo		Retiro
Vf (m/h)	0,6	1	0,6	0,4	1	0,5	0,64
Fracción pistón %	20	57	43	52	45	28	46
Zonas muertas %	23	16	8	2	12	12	8
Fracción mezclada %	57	27	49	46	43	60	46

Vf: Velocidad de filtración.

Los resultados mostraron que al operar los reactores de cada planta con una velocidad de filtración similar, El Retiro presentó mejor comportamiento hidráulico, debido a que presenta menos porcentaje de flujo mezclado incrementando la fracción de flujo a pistón; también se puede observar que tiene menos zonas muertas. Es evidente que el flujo de todos los reactores operados a diferentes caudales es de mezcla completa. Las cuatro

plantas presentaron zonas muertas donde hay poco o ningún intercambio del trazador, por lo tanto la eficiencia de remoción de contaminantes puede verse afectada por tal comportamiento hidráulico. En las plantas de La Sirena y Arroyohondo se considero realizar la prueba en un filtro trabajando con un caudal menor y el otro mayor. Esto para comparar resultados y poder identificar de qué manera trabaja los FGAC.

Se muestra que al operar los reactores con una velocidad de filtración menor a la de operación normal es posible tener un mejor comportamiento hidráulico pues hay una reducción notable de las zonas muertas como se puede ver en el caso de la Sirena.

Hay que resaltar que persiste el flujo dual, es decir, una parte a pistón y la otra a flujo mezclado. Para determinar la tendencia del flujo de los filtros se empleo el índice de Morrill, hallando la relación entre el segmento comprendido entre el 10% y el 90% que es el más regular. Se hizo un análisis comparando las cuatro plantas funcionando con velocidades similares y un análisis con diferentes velocidades en La Sirena y Arroyohondo, mostrado en la Tabla 18.

Tabla 18 Índice de Morrill

	Golondrinas	Retiro	Sirena			Arroyohondo	
Vf (m/h)	0,6	0,5	0,4	0,6	1	0,5	1
T90	90	136	160	150	75	89	60
T10	20	54	74	55	28	32	20
IM=T90/T10	4,5	2,5	2,16	2,7	2,7	2,78	3

En la comparacion de las plantas con velocidades de filtración similares, resultan con índice de Morrill mayor a 1, corroborando que no hay predominio de flujo a pistón en las unidades evaluadas. En la comparacion de diferentes velocidades, en Arroyohondo y la Sirena, se puede notar que el indice de morrill es muy parecido y son valores lejanos a 1. La velocidad de filtracion mas baja representó el menor indice de Morril.

Modelo de reactores completamente mezclados en serie

En la Figura 17 Se muestra la curva experimental junto con las curvas teóricas de los reactores completamente mezclados en serie. Se plasman las curvas $n=3, 5, 7, 8$ y 10 reactores en serie. El modelo experimental del Retiro se asemeja a $n=8$, el de Golondrinas a $n=5$ y los de la Sirena y Arroyohondo a $n=7$, indicando claramente que el mejor comportamiento hidráulico en este caso, lo tiene el Retiro. Se corrobora la tendencia del Modelo Wolf-Resnick de presencia de flujo a pistón combinado con mezclado, pero no predominio de flujo a pistón.

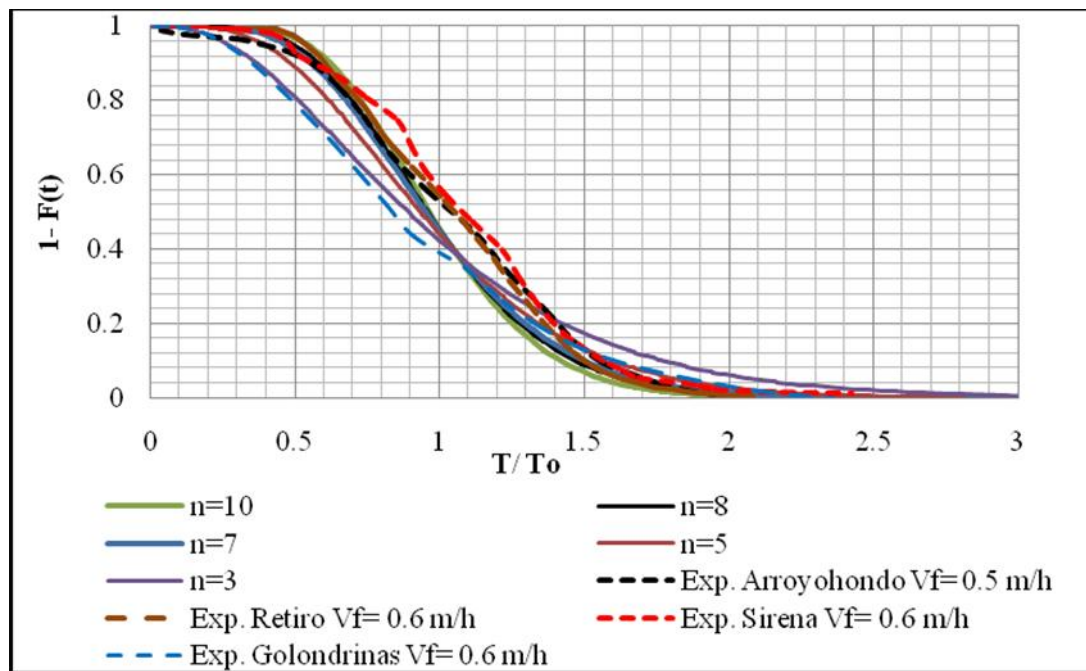


Figura 17 Reactores en serie plantas

6.2.5 Velocidad de sedimentación

La velocidad de asentamiento de las partículas depende de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre las partículas, la cuales son diferentes para cada planta. En la Figura 18, se presenta la velocidad de asentamiento de los sólidos en los FGAC de las 4 plantas, lo cual

es necesario conocer para estimar el tiempo lavado para que las partículas no vuelvan a sedimentarse, en especial en el lavado superficial.

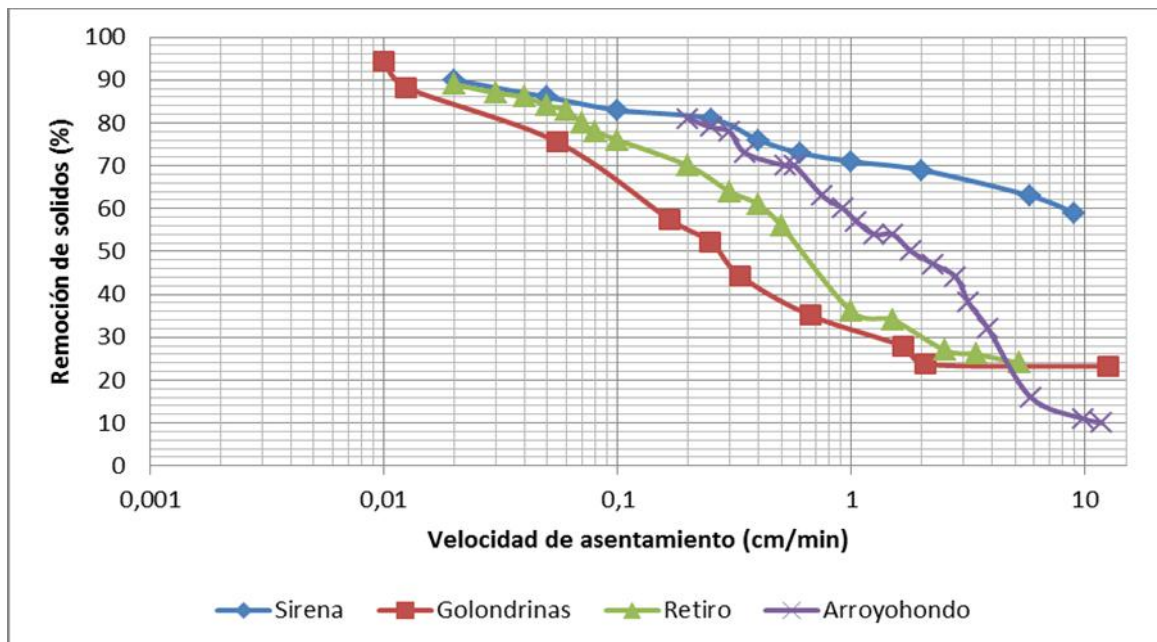


Figura 18 Velocidad de asentamiento

En la Figura 18 se puede observar que la velocidad de asentamiento de las partículas analizadas en los FGAC de las plantas tienen valores diferenciados. La velocidad de asentamiento media en Golondrinas fue 0,25 cm/min, en el Retiro de 0,6 cm/min, en Arroyohondo de 2 cm/min y en la Sirena fue mucho mayor con un valor cercano a 9 cm/min. Teniendo en cuenta la altura de agua sobrenadante de 10 cm durante el lavado superficial entonces el tiempo medio de asentamiento en Golondrina es de 40 min, en El retiro de 17 min, en Arroyohondo de 5 min y en la Sirena de 1 min, el caso más crítico para el lavado superficial es el de la Sirena y de ahí la necesidad de optimizar el lavado superficial. En el caso de Golondrinas también es crucial porque el 20% de las partículas tienen velocidad de asentamiento mayor a 10 cm/min requiriendo un tiempo de asentamiento de 1 minuto y con el actual sistema de lavado por orificio es muy complejo garantizar una buena limpieza superficial. Lo que indica que el lavado superficial se debe optimizar para hacerlo en tiempos más cortos y evitar que las partículas vuelvan a

sedimentarse. La opción de vertederos frontales o laterales en los FGAC se puede adoptar en esas dos plantas teniendo en cuenta que en los FGAC de El Retiro y Arroyohondo funcionan satisfactoriamente.

6.3 Revisión hidráulica de las unidades FGAC

En cada planta de tratamiento se determinó las pérdidas de carga total en el filtro grueso para la condición de lavado, para verificar la altura de la descarga de la tubería de lavado. Básicamente se verificó que las pérdidas totales coincidan con la altura medida desde el nivel de agua en el compartimiento principal hasta la cota de descarga del tubo de salida. Las pérdidas totales fueron estimadas haciendo la sumatoria de todas las pérdidas parciales en el sistema tal como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19 Estimación de las pérdidas con la tasa de lavado de operación medida

Pérdidas	Unidades				
		Arroyohondo (Tlm=7,2)	Sirena (Tlm=12)	Retiro (Tlm=3,5)	Golondrinas (Tlm= 6)
Hp: Pérdida en el principal.	m	0,021	0,052	0,479	0,038
HL: Pérdida en el lateral.	m	0,011	0,020	0,076	0,034
Ho: Pérdida en el orificio.	m	0,070	0,026	0,089	0,179
Hmf: Pérdida medio filtrante.	m	0,150	0,150	0,150	0,150
Pérdida por cambio de sección	m	0,000	0,000	0,030	0,010
Pérdida por Tees	m	0,110	0,360	0,410	0,180
Pérdida por válvula de mariposa	m	0,129	0,129	0,129	0,129
Pérdida por codos	m	0,040	0,340	0,520	0,060
Pérdida por Salida/Entrada	m	0,090	0,380	0,580	0,160
Hlon	m	0,009	0,325	0,397	0,116
Pérdida Total	m	0,630	1,782	2,860	1,056
Altura de la válvula existente	m	1,62	4,3	2,2	1,55

Tlm: Tasa de lavado medida (m/h)

Según la Tabla 19 en las plantas no se cumple con las tasas de lavado recomendadas en la literatura 60-90 m/h (Pardon, 1989), 20-40 m/h (Wegelin *et al.*, 1997), 15-20 m/h (Galvis *et al.*, 1999), 200 m/d ó 8,3 m/h (Di Bernardo y Sabogal Paz, 2008), si hay tasas de lavado bajas en consecuencia habrán bajas fuerzas de arrastre sobre el material acumulado (Ahsan, 1995), mostrando que las condiciones actuales de lavado hidráulico de las plantas no son óptimas.

En las plantas se hacen lavados frecuentes sin que el filtro se haya colmatado ni alcance su máximo nivel de pérdida de carga, además, las limpiezas se programan de acuerdo a la variación de la calidad del agua cruda. El común en todas las plantas es el lavado semanal; esto ha favorecido para que los sistemas de pre filtración no se obstruyan, lo cual sugiere que la frecuencia de limpieza puede ser más eficaz que la magnitud de la tasa de lavado. Sin embargo, el gran interrogante es lo que pasa con la eficiencia del FGAC cuando se hacen lavados tan frecuentes; esto sugiere que se debe desarrollar más investigación en éste aspecto.

En la Tabla 20 se muestra lo que sucede si en cada una de las plantas se aumenta la tasa de lavado, a los valores recomendados por Galvis *et al.* (1999).

Tabla 20 Estimación de pérdidas con tasa de lavado recomendada.

Pérdidas	Unidades				
		Arroyohondo (Tlr=15)	Sirena (Tlr=15)	Retiro (Tlr=15)	Golondrinas (Tlr=15)
Hp: Pérdida en el principal.	m	0,0	0,1	0,1	0,1
HL: Pérdida en el lateral.	m	0,0	0,3	0,1	0,0
Ho: Pérdida en el orificio.	m	0,3	0,0	0,5	0,9
Hmf: Pérdida medio filtrante.	m	0,2	0,2	0,2	0,2
Pérdida por cambio de sección	m	0,0	0,1	0,1	0,0
Pérdida por Tees	m	0,2	0,8	0,2	0,3
Pérdida por válvula de mariposa	m	0,1	0,1	0,1	0,1
Pérdida por codos	m	0,2	0,8	9,8	0,2
Pérdida por Salida/Entrada	m	0,4	0,9	10,9	0,5
Hlon	m	0,0	0,7	0,2	0,0
Total	m	1,4	4,0	22,0	2,2
Altura de la válvula existente	m	1,62	4,3	2,2	1,55

Tlr: Tasa de lavado recomendada (m/h)

Según los datos de la Tabla 20 las plantas que están mas próximas a la tasa de lavado recomendada son Arroyohondo y La Sirena, se tendría que verificar si el sistema de drenaje construido si corresponde al sistema de drenaje diseñado. En el caso de El Retiro habría que rediseñar el sistema de drenaje y en Golondrinas se tendría que verificar desocupando el

filtro si lo que se construyó esta acorde al diseño y corregir y rediseñar el sistema de desagüe de la planta para evitar el represamiento en las cámaras de lavado de los FGAC.

6.4 Principales problemas en las plantas de tratamiento

En la Tabla 21 se listan de forma esquemática los principales problemas asociados a las plantas de tratamiento, las causas y la posible solución.

Tabla 21 Principales problemas en las plantas

Problema	Causa	Planta	Solución
Limitado control de pérdida de carga	Ausencia de las reglas para medir pérdida de carga	Sirena Arroyohondo Golondrinas Retiro	Instalación de reglas de pérdida de carga o uso de otro método para medir
Falta de control de caudal	Ausencia de la regla de aforo	Todas	Instalación de regla de aforo. Llevar registro del control de operación y mantenimiento.
Ausencia de análisis de calidad de agua	El ente administrador no le ha dado prioridad	Golondrinas La Sirena	Revisar la reglamentación del decreto 2115 y hacer los ajustes de reserva de fondos para los análisis básicos de calidad de agua. Enseñar al operador el uso de equipo básico (turbidímetro, pH metro, colorímetro y comparador de cloro residual)
Entrada de aire al filtro	Diferencias de nivel de agua entre la entrada y la salida del filtro	Retiro	Aumentar el nivel de agua en el compartimiento principal para eliminar el aire, haciendo que la salida este totalmente sumergida.
Desperdicio de agua en la limpieza superficial del filtro	Ausencia de cámaras para separar caudales durante el lavado de los filtros (salen de funcionamiento dos unidades cuando se lava una.)	Retiro	Independizar los caudales de cada filtro, para que cuando se lave no dejen de funcionar los demás.

Tabla 21 Principales problemas en las plantas (cont.)

Problema	Causa	Planta	Solución
Baja tasa de lavado	Baja capacidad de transporte del sistema de drenaje.	En todas, pero las más limitadas son Golondrinas y El Retiro	Optimizar el sistema de drenaje en el Retiro
	Baja capacidad del desagüe de la planta		Optimizar el desagüe de la planta en Golondrinas
Deficiente lavado superficial	La salida del agua se hace por medio de orificios; acumulación de sólidos en la capa superior del lecho de grava.	La Sirena; Golondrinas	Rediseñar con canaletas laterales para facilitar la salida del agua sobrenadante del filtro
Deficientes válvulas de control a la entrada	Las válvulas existentes no son las más adecuadas para manejar los caudales a la entrada. Además las válvulas están oxidadas	Golondrinas	Instalar nuevas válvulas

7 CONCLUSIONES

Operación y mantenimiento de los FGAC

En todas las plantas de tratamiento las unidades de filtración en gravas de flujo ascendente funcionan de manera continua y garantizan un buen pre- tratamiento para los filtros lentos de arena. El material filtrante cumple con el rango de granulometrías recomendadas en la literatura para diseño de FGAC. La porosidad de los lechos filtrantes caracterizados en las plantas no presentó variación con respecto al tamaño de las gravas de cada unidad, pero se evidenció una mayor porosidad en los lechos que emplean gravas trituradas de rocas, como en el caso de la Sirena, donde se apreció menor eficiencia de remoción en todos los parámetros medidos.

En las cuatro unidades de filtración en grava analizadas se evidenció poca variación en la pérdida de carga entre cada carrera de filtración (<0.05 m), a pesar de esto a las unidades se les hace mantenimiento cada semana. Esta práctica previene la obstrucción de los medios filtrantes pero puede afectar la eficiencia de remoción de la unidad. Se evidenciaron sobre cargas de caudal en La Sirena con valores del 57%, mientras que en Golondrinas se trabaja por debajo de su capacidad, pues su caudal alcanza solo el 80.7% del caudal de diseño. En los demás filtros se trabaja con el caudal de diseño.

Los tiempos de mantenimiento de cada unidad de filtración en grava de flujo ascendente en horas hombre por metro cuadrado fueron los siguientes: La Sirena 0,07, Golondrinas 0,1, El retiro 0,04 y en Arroyohondo 0,05. Aunque el lavado de los filtros por parte de los operadores es apropiado, se manejan tiempos de mantenimiento altos; en el caso de La Sirena y Golondrinas, por deficiencias en la forma de extraer el agua del lavado superficial mediante orificio.

Se pudo apreciar mejor limpieza en los filtros que utilizan vertedero con canal de descarga como en el Retiro y Arroyohondo. El tiempo de mantenimiento también se ve afectado por el tiempo para lavado de fondo de la unidad, en las plantas que emplearon menor tasa de lavado como El Retiro y Golondrinas esta actividad representó el 7,73% y el 7,75% respectivamente, del tiempo de mantenimiento.

En los filtros de grava de todas las plantas no se hace seguimiento a la calidad de agua. En Golondrinas y La Sirena, no se tienen registros de operación y mantenimiento de las unidades. En ninguna de las plantas se tienen instaladas las reglas de aforo y medición de pérdida de carga de los FGAC.

Los costos por m^3 producido en cada planta fueron los siguientes: La Sirena 275 $\$/m^3$, Golondrinas 67 $\$/m^3$, El retiro 225 $\$/m^3$ y en Arroyohondo 477 $\$/m^3$. Los costos de personal representan el mayor porcentaje sobre el total de costos de operación, exceptuando Arroyohondo, donde se manejan costos altos por consumo de energía para el bombeo del agua a la planta.

Eficiencia de los FGAC

Las fuentes presentaron alto riesgo microbiológico en términos de Coliformes totales y de E. Coli, para los FGAC de Arroyohondo y el Retiro y de menor riesgo para La Sirena y Golondrinas. El FGAC de mejor desempeño en la remoción de turbiedad fue el de El Retiro con un $P_{50} < 56\%$, mientras que Golondrinas y Arroyohondo se comportaron de manera similar, con P_{50} entre el 32% y el 36% respectivamente; por su parte, el FGAC de la Sirena muestra el más pobre desempeño en la remoción de turbiedad con un $P_{50} < 18\%$. Frente a la remoción de color el FGAC de mejor desempeño fue el de Arroyohondo con un $P_{50} < 40\%$, seguida por el de El Retiro con $P_{50} < 34\%$, mientras que la sirena mostro el más bajo desempeño con $P_{50} < 8\%$. Frente a la remoción de microorganismos, el FGAC de mejor desempeño en la remoción de e-coli fue el de Golondrinas con $P_{50} < 0,6$ log, seguido

por el de El Retiro con $P_{50} < 0,51$ y el FGAC con más pobre desempeño fueron los de Arroyohondo y la Sirena con $P_{50} < 0,2$ y $0,1$ log respectivamente.

Al observar las variaciones en la velocidad de filtración en el FGAC de La Sirena, se evidenció mejor desempeño cuando el filtro no es sobrecargado y trabaja con la velocidad de diseño, en ese caso la remoción de turbiedad fue de $P_{50} < 20\%$, Cuando en el filtro se incrementó en un 57% la velocidad de filtración la eficiencia de remoción de turbiedad bajo a $P_{50} < 15\%$.

Comportamiento hidráulico

El comportamiento hidráulico analizado mediante prueba de trazadores en los FGAC, mostró que estas unidades presentan flujo dual (pistón y mezcla completa), con presencia de zonas muertas. La fracción de flujo a pistón varió entre el 20-57%, la fracción mezclada entre 27-60% y las zonas muertas entre 2-23%.

La velocidad de asentamiento de las partículas drenadas en el filtro de grava fueron las siguientes: Golondrinas fue 0,25 cm/min, en el Retiro de 0,6 cm/min, en Arroyohondo de 2 cm/min y en la Sirena fue mucho mayor con un valor cercano a 9 cm/min. El tiempo medio de asentamiento en Golondrina es de 40 min, en El retiro de 17 min, en Arroyohondo de 5 min y en la Sirena de 1 min, el caso más crítico para el lavado superficial fue para La Sirena y Golondrinas.

La revisión hidráulica de las unidades FGAC, indicó, que ninguna de las plantas cumple con el valor mínimo de tasa de lavado recomendado para los FGAC de 15 m/h, lo cual puede afectar el tiempo de limpieza de la unidad y la eficiencia de lavado.

8 RECOMENDACIONES

- El criterio de lavados semanales, debe ser revisado a la luz los resultados de este trabajo en las cuatro plantas, pues la pérdida de carga no crece de manera acelerada y la eficiencia remocional del filtro se puede afectar.
- Optimizar el lavado superficial, en Golondrinas y la Sirena es crucial ya que el actual sistema de lavado por orificio no permite una eficiente evacuación del agua superficial con sólidos. En estas unidades de FGAC, es conveniente analizar la posibilidad de instalar vertederos frontales con canal de recolección.
- El seguimiento de la calidad del agua en estas unidades es crucial al menos en parámetros básicos como turbiedad, color y pH. Se debe implementar un sistema de registro de la calidad del agua y de las actividades de operación y mantenimiento.
- En las unidades de FGAC de Golondrinas y El Retiro se debe optimizar el sistema de lavado hidráulico, para lo cual es conveniente revisar y ajustar el sistema de drenaje.
- En Golondrinas se deben cambiar las válvulas de control de caudal de entrada a la unidad y revisar optimizar el desagüe principal de la planta para evitar el represamiento de agua en la cámara de lavado del FGAC.
- Revisar la conveniencia de usar grava triturada como medio filtrante, porque en el caso de La Sirena este medio mostro baja eficiencia de remoción.

9 BIBLIOGRAFÍA

Ahsan, T. (1995). Process analysis and optimization of direct horizontal-flow roughing filtration Institute for Water Education (IHE). Holanda, Delft.

APHA, AWWA y WPCF (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WPCF). USA.

Cadavid, N. (2008). Agua para consumo domestico en Colombia, costos y regulación tarifaria. Revista Gestión y Ambiente. 11: 97-108.

Contraloría General de la República (2007). Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2007-2008. Bogotá D.C., Colombia.

Corredor, D. y Caicedo, L. (2005). Modelos matemáticos para reactores biológicos de lecho empacado (PBR): una revisión bibliográfica. Revista ingeniería e investigación 25(2005): 101-110.

DANE (2005). Censo 2005. Bogotá D.C., Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Consulta: Mayo, 2012. *Página web:* <http://www.dane.gov.co/Censo/>.

Di Bernardo, L. (1993). Métodos e técnicas de tratamiento de agua. (Vol. II). Sao Paulo.

Di Bernardo, L. y Sabogal Paz, L. (2008). Selección de tecnologías de tratamiento de agua. (Vol. I): 878 p. Sao Carlos.

El Espectador (2008). Colombia sólo trata 9% de sus aguas residuales. Consulta: Abril, 2010. *Página web:* <http://www.elespectador.com/impreso/negocios/articuloimpreso-colombia-solo-trata-9-de-sus-aguas-residuales>.

ESAAG (sin fecha). Empresa Administradora de Servicios Públicos, Acueducto y Alcantarillado (ESAAG). Consulta: Diciembre, 2011. *Página web:* <http://www.cali.gov.co/sil/sil.php?id=4919&letra=E>.

Fair, G., Geyer, J. y Okun, D. (1984). Water and waste water engineering. Editorial J.Wiley. Vol. II.

Florez, J. y Ortiz, J. (2002). Efecto del lavado hidráulico en clarificadores de filtración gruesa ascendente en capas. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Galvis, G., Latorre, J. y Visscher, J. (1999). Filtración en múltiples etapas. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Instituto de Investigación y Desarrollo en

Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara) y Centro Internacional de Agua y Saneamiento (IRC).

Gómez, C. (2001). El rol de las comunidades en la gestión de sistemas de abastecimiento de agua en países de desarrollo. Universidad del Valle y Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara). Cali, Colombia.

Huisman, L. y Wood, W. (1974). Slow sand filtration. World Health organization (WHO). Geneva, Switzerland.

INASET (2008). Proyecto de desarrollo concurrente regional –PDCR. Estudio sobre operación y mantenimiento de infraestructura pública. Bolivia.

Ives, K. (1990). Testing of filter media. London.

Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento (RAS). Sistemas de acueducto – Título B. Bogotá D.C., Colombia.

MPS y MAVDT (2007). Resolución 2115. Ministerio de la Protección Social (MPS) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial (MAVDT). Consulta: Junio, 2012. *Página web*:
<http://www.sui.gov.co/suibase/formatosEstratificacion/normatividad/Res.%202115%20de%202007.pdf>.

OEI y CEPAL (2007). Cohesión social en América Latina. Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Quiroga, E. y Visscher, J. (1999). Transferencia de tecnología en el sector de agua y saneamiento en Colombia. Universidad del Valle y Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara). Cali, Colombia.

Restrepo, I. (2001). La comunidad como proveedora de agua potable en la periferia marginal urbana, La Sirena. Universidad del Valle y Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara). Cali, Colombia.

Sánchez, D., Sánchez, A., Galvis, G. y J, L. (2006). Multi-stage Filtration- Thematic Overview Paper 15. Universidad del Valle, Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara) y Centro Internacional de Agua y Saneamiento (IRC). Cali, Colombia.

SISAV (2003). Programa de abastecimiento de agua rural P.A.A.R. Sistema de Información del Sector Agropecuario del Valle del cauca (SISAV). Consulta: Marzo, 2010. *Página web*.

Vargas, S., Hincapié, M., Latorre, J., Galvis, G. y Fernández, J. (1998). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento por filtración en múltiples etapas: manual para operadores.

Visscher, J. (2006). Facilitating community water supply treatment. Wageningen University. Países bajos.

Wegelin, M., Latorre, J. y Galvis, G. (1997). La filtración gruesa en el tratamiento de agua de fuentes superficiales. Universidad del Valle y Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara). Cali, Colombia.

WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality 4ª edición, World Health Organization (WHO).

ANEXOS

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA FILTRACIÓN EN
GRAVAS DE FLUJO ASCENDENTES A ESCALA REAL

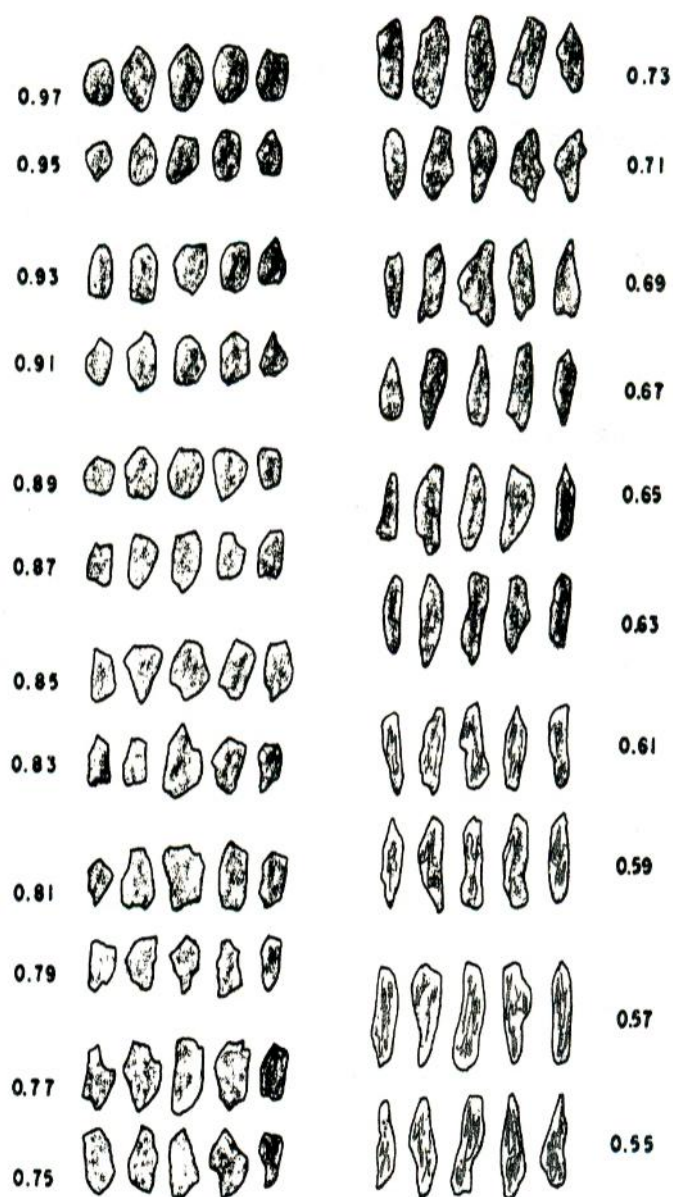
ANEXO A. FORMATO DE RECOPIACIÓN

Semana del _____ hasta el _____ Planta _____ Operador _____ Hoja Nº __.

DIA	Q(l/s)		H(cm)		Vf (m/h)		Pérdida de Carga (cm)	
	08:00 a.m.	03:00 p.m.	08:00 a.m.	03:00 p.m.	08:00 a.m.	03:00 p.m.	08:00 a.m.	03:00 p.m.
Lunes								
Martes								
Miércoles								
Jueves								
Viernes								
Sábado								
Domingo								

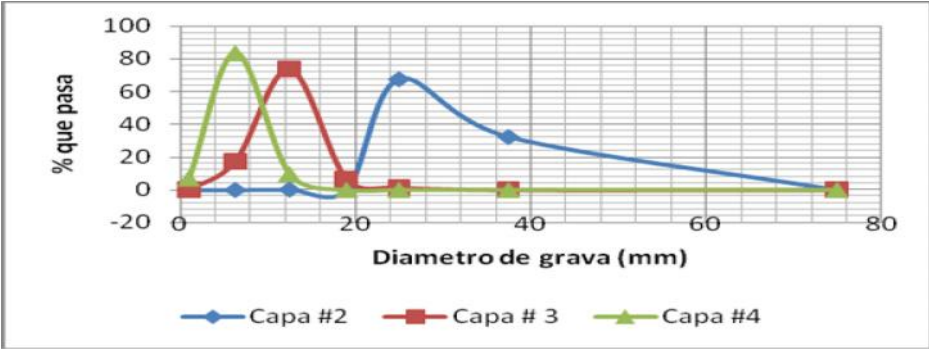
Observaciones:

**ANEXO B. ESCALA DE COMPARACIÓN VISUAL DE FORMA DE LOS
GRANOS Y VALORES DE ESFERICIDAD (Di Bernardo, 1993)**

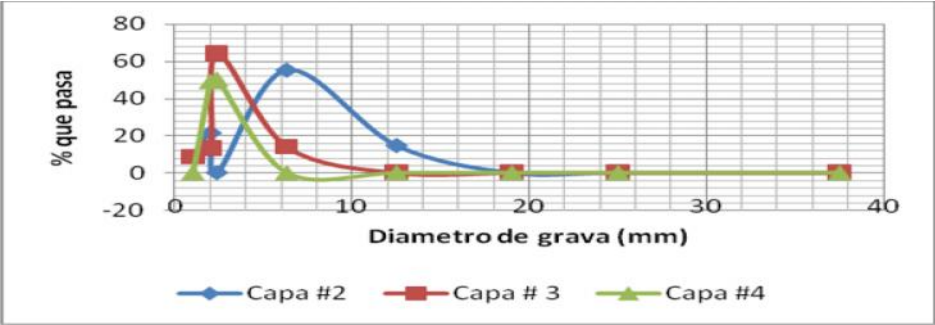


ANEXO C. GRAFICAS DE GRANULOMETRIA

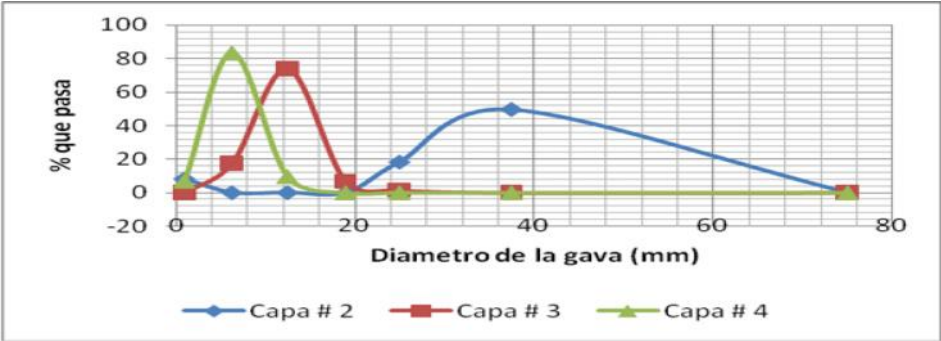
Granulometría – Sirena



Granulometría – Golondrinas



Granulometría - Retiro



ANEXO D. CALIDAD DE AGUA

Tabla D-1 Calidad de agua planta La Sirena

Fecha	Jornada	Punto	Turbiedad	pH	Color Aparente	Coliformes Totales (UFC/100ml)	E. coli (UFC/100ml)	Color Real
11/04/2011	Mañana	Entrada FGA	1,63	7,26	12,36	1630	80	13,79
	Tarde		1,73	7,4	10,93	1570	150	10,21
12/04/2011	Mañana		1,48	7,43	14,50	1760	570	14,50
	Tarde		1,5	7,48	15,21	1800	80	14,50
13/04/2011	Mañana		2,78	7,42	28,79	1870	180	25,21
	Tarde		1,7	7,61	16,64	2880	70	24,50
14/04/2011	Mañana		1,44	7,7	10,93			10,21
	Tarde		1,34	7,53	12,36			9,50
15/04/2011	Mañana		1,15	7,48	10,21			8,79
	Tarde		1,07	7,47	11,64			8,07
16/04/2011	Mañana		2,86	7,46	22,45			21,67
	Tarde		2,1	7,45	27,36			23,79
11/04/2011	Mañana	Salida FGA	1,6	7,78	11,64	1440	60	12,36
	Tarde		1,38	7,68	11,64	1500	120	11,64
12/04/2011	Mañana		1,39	7,48	15,21	1560	550	13,79
	Tarde		1,21	7,67	13,79	1260	70	13,07
13/04/2011	Mañana		2,28	7,51	24,50	1850	130	23,79
	Tarde		1,6	7,93	17,36	2620	50	22,36
14/04/2011	Mañana		1,3	7,69	13,79			11,64
	Tarde		1,01	7,65	11,64			10,21
15/04/2011	Mañana		0,96	7,49	9,50			8,07
	Tarde		0,95	7,66	9,50			8,07
16/04/2011	Mañana		1,84	7,83	21,86			19,14
	Tarde		1,90	7,72	23,79			21,64

Tabla D-2 Calidad de agua planta El Retiro

Fecha	Tiempo	Jornada	Punto	Turbiedad	pH	Coliformes Totales (UFC/100ml)	E. coli (UFC/100ml)	Color Real
31/03/2011	7,00	Tarde	Entrada FGA	2,30	8,06	2860	100	25,214
01/04/2011	24,00	Mañana		1,42	7,45	9000	1100	10,929
	31,00	Tarde		1,79	7,48	3810	80	13,786
02/04/2011	55,00	Tarde		2,90	7,80	10100	1300	14,500
03/04/2011	79,00	Tarde		2,27	8,10	9700	160	15,929
	96,00	Mañana		2,40	7,63	1800	300	27,357
06/04/2011	103,00	Tarde		2,42	7,95	6500	230	22,357
	120,00	Mañana		2,95	7,16	8700	700	22,357
07/04/2011	127,00	Tarde		2,39	7,51	4500	160	27,357
	144,00	Mañana		0,98	7,60	7300	600	20,929
08/04/2011	151,00	Tarde		1,28	7,60	5000	150	18,786
	168,00	Mañana		3,12	7,40	6300	1000	34,500
11/04/2011	175,00	Tarde		3,37	7,50	6400	130	30,214
	192,00	Mañana		7,93	7,50	9900	1200	60,214
12/04/2011	199,00	Tarde		8,62	7,40	9800	310	52,357
	216,00	Mañana		2,92	7,42	12300	1600	28,786
13/04/2011	223,00	Tarde		3,77	7,38	18500	790	37,357
	240,00	Mañana		3,57	7,33	10800	1500	44,500
14/04/2011	247,00	Tarde		4,58	7,36	9000	420	35,929
	264,00	Mañana		11,80	7,44	8800	1800	57,357
15/04/2011	271,00	Tarde		11,40	7,51	10800	340	44,500
31/03/2011	7,00	Tarde	Salida FGA	1,40	7,63	2250	40	15,214
01/04/2011	24,00	Mañana		0,86	7,53	8100	900	8,786
	31,00	Tarde		0,88	7,71	3150	50	8,786
02/04/2011	55,00	Tarde		0,94	7,44	5300	800	8,786
03/04/2011	79,00	Tarde		0,96	7,60	3000	40	11,643
	96,00	Mañana		1,55	7,78	1700	200	18,071
06/04/2011	103,00	Tarde		1,22	7,74	3300	50	14,500
	120,00	Mañana		1,27	7,25	2200	300	15,929
07/04/2011	127,00	Tarde		1,04	7,43	2300	40	17,357
	144,00	Mañana		0,85	7,50	4000	300	13,786
08/04/2011	151,00	Tarde		0,72	7,50	300	20	13,071
	168,00	Mañana		1,39	7,30	2300	400	28,786
11/04/2011	175,00	Tarde		1,33	7,40	1800	30	20,929
	192,00	Mañana		3,27	7,30	6200	400	38,071
12/04/2011	199,00	Tarde		2,81	7,30	6400	60	33,786
	216,00	Mañana		1,90	7,46	7500	600	24,500
13/04/2011	223,00	Tarde		1,89	7,35	5200	100	25,929
	240,00	Mañana		2,06	7,29	7200	600	28,071
14/04/2011	247,00	Tarde		1,72	7,29	3600	50	23,786
	264,00	Mañana		4,70	7,40	6000	800	40,929
15/04/2011	271,00	Tarde		2,96	7,45	5500	40	32,357

Tabla D-3 Calidad de agua planta Golondrinas

Fecha	Jornada	Punto	Turbiedad	pH	Coliformes Totales (UFC/100ml)	E. coli (UFC/100ml)
11/07/2011	Mañana	Entrada FGA	5,64	8,18	640	120
	Tarde		7,99	8,29	4800	170
12/07/2011	Mañana		5,97	8,15	5050	100
	Tarde		11,1	8,24	452	14
13/07/2011	Mañana		10,7	8,26	60	8
	Tarde		5,08	8,26	400	100
14/07/2011	Mañana		3,8	8,42	440	60
	Tarde		3,97	8,3	360	80
15/07/2011	Mañana		3,2	8,35	320	60
	Tarde		3,73	8,25	230	50
16/07/2011	Mañana		3,64	8,33	160	30
	Tarde		5,83	8,3	300	90
17/07/2011	Mañana		4,83	8,38	280	40
	Tarde		3,81	8,31	210	60
11/07/2011	Mañana	Salida FGA	5,33	8,22	200	0
	Tarde		4,75	8,39	3020	20
12/07/2011	Mañana		3,64	8,25	3000	20
	Tarde		6,31	8,22	1490	100
13/07/2011	Mañana		5,3	8,33	340	60
	Tarde		3,86	8,31	300	40
14/07/2011	Mañana		3,66	8,41	200	20
	Tarde		2,76	8,25	240	0
15/07/2011	Mañana		3,15	8,37	160	20
	Tarde		2,65	8,3	210	30
16/07/2011	Mañana		2,74	8,33	100	50
	Tarde		3,26	8,33	150	60
17/07/2011	Mañana		2,94	8,4	120	50
	Tarde		2,6	8,39	130	60

Tabla D-4 Calidad de agua planta Arroyohondo

Fecha	Jornada	Punto	Turbiedad	pH	Coliformes Totales (UFC/100ml)	E. coli (UFC/100ml)	Color Real
21/02/2011	Mañana	Entrada FGA	2,03	8,27	9950,00	1250,00	1,29
	Tarde		2,10	8,20	10000,00	1350,00	15,21
22/02/2011	Mañana		1,85	8,15	9000,00	2100,00	8,79
	Tarde		2,20	8,31	22600,00	3000,00	20,93
23/02/2011	Mañana		2,60	7,40	18100,00	2500,00	18,07
	Tarde		2,10	7,70	22900,00	1800,00	17,36
24/02/2011	Mañana		4,95	8,15	25000,00	3200,00	20,93
	Tarde		0,82	8,48	8000,00	0,00	2,36
25/02/2011	Mañana		0,66	9,26	1700,00	100,00	1,64
	Tarde		4,70	8,45	17000,00	3600,00	19,50
26/02/2011	Mañana		2,86	8,23	19500,00	1400,00	15,21
	Tarde		3,00	8,38	180800,00	2200,00	13,07
21/02/2011	Mañana	Salida FGA	1,80	8,15	6000,00	950,00	5,93
	Tarde		1,56	8,20	6550,00	1100,00	8,79
22/02/2011	Mañana		1,40	8,16	6100,00	1300,00	10,21
	Tarde		1,80	8,20	14400,00	2100,00	11,64
23/02/2011	Mañana		1,52	7,71	4100,00	800,00	10,93
	Tarde		1,30	7,75	4200,00	700,00	11,64
24/02/2011	Mañana		2,95	8,16	19100,00	2000,00	18,07
	Tarde		0,45	8,18	6300,00	0,00	2,36
25/02/2011	Mañana		0,64	9,05	16700,00	3200,00	1,64
	Tarde		2,90	8,77	19400,00	6700,00	20,93
26/02/2011	Mañana		1,84	8,24	15500,00	800,00	8,79
	Tarde		1,90	8,30	359000,00	1300,00	9,50