

LIBRARY  
INTERNATIONAL REFERENCE CENTRE  
FOR COMMUNITY WATER SUPPLY AND  
SANITATION (IRC)



## PROYECTO INTEGRADO DE INVESTIGACION Y DEMOSTRACION DE METODOS DE PRETRATAMIENTO PARA SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

### INFORME FINAL - DESARROLLO, LOGROS Y PERSPECTIVAS -

Con el Apoyo del DGIS, Directorate General for Development Cooperation  
of the Netherlands Ministry of Foreign Affairs



Proyectos de Investigación  
Desarrollo y Transferencia  
Integral de Tecnología  
Aplicada al Abastecimiento de Agua

255-D-92PR-10774

**CINARA  
CENTRO INTER-REGIONAL DE ABASTECIMIENTO Y REMOCION DE  
AGUA**

CINARA, es una fundación sin ánimo de lucro, orientada a la investigación, el desarrollo y la transferencia organizada e integral de tecnología en el campo del abastecimiento de agua potable y de la remoción de agua. Su trabajo se dirige principalmente hacia el sector rural, el pequeño y mediano municipio y los asentamientos urbano-marginales, tradicionalmente los más desprotegidos en el cubrimiento de los servicios públicos.

En la fundación trabajan ingenieros conjuntamente con personal de las Ciencias Sociales y de las Ciencias Básicas, en un esfuerzo integrado con profesionales y técnicos de las instituciones cooperantes, los líderes del agua y las comunidades mismas preocupadas por el mejoramiento de sus condiciones sanitarias y las preservación de su medio ambiente.

CINARA mantiene un Convenio de Cooperación Académica e Investigativa con la Universidad del Valle y adelanta proyectos mediante convenios o contratos con organizaciones locales, nacionales e internacionales del sector de agua, considerado como un componente vital en un desarrollo fundamentado en el mejoramiento de la calidad de vida.

Para información adicional, dirigirse a:

CINARA  
A.A. 25360  
CALI, COLOMBIA, SUR AMERICA

**IRC. International Water and Sanitation Centre**

El IRC es una fundación independiente y sin ánimo de lucro que actúa como Centro Colaborante en Abastecimiento de Agua y Saneamiento Ambiental, en interrelación con el Gobierno de los Países Bajos, el PNUD, el Banco Mundial, la UNICEF y la OMS.

El IRC está al servicio de las miles de personas que dedican sus esfuerzos al mejoramiento de las condiciones sanitarias y apoya el desarrollo de organizaciones orientadas al cumplimiento de este objetivo.

Su radio de acción se extiende a entidades adscritas a la Organización de las Naciones Unidas por medio de convenios bilaterales, a instituciones del sector de agua y saneamiento y a organizaciones no gubernamentales en los países menos desarrollados.

El trabajo del IRC, está orientado a la generación, transferencia y aplicación de información y experiencia para el mejoramiento de los suministros de agua y el saneamiento. En su metodología, enfatiza la integración de aspectos técnicos y socioeconómicos y concentra esfuerzos en la participación de la comunidad, el papel de la mujer, el uso apropiado de la tecnología, la educación en salud y el desarrollo de estrategias para facilitar el intercambio de información.

Las solicitudes para mayor información sobre el IRC, deben dirigirse a:

IRC  
P.O. BOX 93190, 2509 AD  
LA HAYA, PAISES BAJOS

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE  
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION (IAC)  
P.O. Box 93190, 2500 AD The Hague  
Tel. (070) 814911 ext. 141/142

ISBN 1077Y  
LC: 255.0 92 PR

PROYECTO INTEGRADO DE INVESTIGACION Y DEMOSTRACION  
DE METODOS DE PRETRATAMIENTO PARA SISTEMAS  
DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

INFORME FINAL

- DESSARROLLO, LOGROS Y PERSPECTIVAS -

© Derechos Reservados por CINARA/IRC-International Water and Sanitation Centre

CINARA/IRC tienen derechos reservados según el Protocolo 2 de la Convención Universal de Derechos de Autor. Sin embargo, por medio de la presente se da permiso para la reproducción de este material, parcial o totalmente, para propósitos educativos, científicos o relacionados con el desarrollo, excepto aquellos que influyan venta comercial, siempre y cuando (a) se cite completamente la fuente, y (b) se notifique por escrito a CINARA, Universidad del Valle, A.A. 25157, Cali, Colombia o el IRC, P.O. Box 93190, 2509 AD, La Haya, Países Bajos.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag
Prefacio	xiii
Summary and conclusions	xv
1. INTRODUCCION	1
2. LA FILTRACION LENTA EN ARENA COMO ALTERNATIVA DE POTABILIZACION DE AGUA	3
2.1 LAS UNIDADES DE FILTRACION LENTA EN ARENA	5
2.2 LIMITACIONES DE LA TECNOLOGIA ORIGINADAS EN LAS CARACTERISTICAS DE LAS FUENTES DE AGUA	7
2.2.1 Niveles de contaminación que superan la eficiencia	8
2.2.2 Reducción o inhibición de la eficiencia	10
2.2.3 Reducción de las carreras o periodos de filtración	11
3. ENFRENTANDO LIMITACIONES CON EL CONCEPTO DE MULTIBARRERA	15
3.1 APLICANDO EL CONCEPTO DE MULTIBARRERA	15
4. ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO	17
4.1 POZOS DE INFILTRACION	17
4.2 GALERIAS DE INFILTRACION	17
4.3 SEDIMENTADOR SIMPLE	18
4.4 FILTROS GRUESOS	19
4.4.1 Filtros Gruesos Dinámicos (FGDi)	20
4.4.2 Filtros Gruesos de Flujo Descendente	20
4.4.3 Filtros Gruesos de Flujo Descendente en Serie (FGDS)	21
4.4.4 Filtros Gruesos de Flujo Ascendente	24
4.4.5 Filtros Gruesos de Flujo Horizontal (FGH)	25
4.5 COMBINACION DE ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO. CONCEPTO DE TRATAMIENTO INTEGRADO	27
4.6 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION SOBRE PRETRATAMIENTOS	28
5. OBJETIVOS	29
5.1 OBJETIVO GENERAL	29
5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	29

6.	INFRAESTRUCTURA PARA LA REALIZACION DEL PROYECTO	30
6.1	ESTACION DE INVESTIGACION Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA APLICADA AL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA.	33
6.2	PROYECTOS A ESCALA REAL	36
7.	DESARROLLO DEL PROYECTO	37
7.1	PLANTAS PILOTO	37
7.1.1	Periodo I	37
7.1.1.1	Puntos y frecuencia de muestreo para análisis de calidad de agua.	39
7.1.1.2	Especificaciones de diseño	41
7.1.1.3	Criterios de mantenimiento	43
7.1.2	Periodos II, III y IV	44
7.1.2.1	Ajustes a los puntos y frecuencias de muestreo para análisis de calidad de agua.	44
7.1.2.2	Ajustes al Diseño	45
7.1.2.3	Criterios de Mantenimiento	48
7.2	PROYECTOS A ESCALA REAL	48
7.2.1	Puntos y frecuencias de muestreo para análisis de calidad de agua	48
8.	PROCEDIMIENTOS Y METODOS ANALITICOS	53
8.1	TOMA DE MUESTRAS	53
8.2	METODOS ANALITICOS	53
9.	MANEJO DE LA INFORMACIÓN	57
9.1	SISTEMAS DE INFORMACION	57
9.2	MODELO DE DISEÑO DE EXPERIMENTO	58
10.	PLAN GENERAL DE ACTIVIDADES	61
11.	PRESENTACION Y DISCUSION ESPECIFICA DE RESULTADOS	63
11.1	PLANTAS PILOTO	63
11.1.1	Agua cruda	63
11.1.2	Periodo I	65
11.1.2.1	Comportamiento de los Acondicionadores	65
11.1.2.2	Comportamiento de las Líneas de Investigación	65
11.1.3	Periodos II, III y IV	76
11.1.3.1	Comportamiento de los Acondicionadores	76
11.1.3.2	Comportamiento de las Líneas de Investigación	76

11.2	PLANTAS A ESCALA REAL	107
11.2.1	Agua cruda	107
11.2.2	Plantas de tratamiento con FGD <sub>i</sub>	109
11.2.3	Plantas de tratamiento con FGAS	111
11.2.4	Plantas de tratamiento con FGAC	117
11.2.5	Plantas de tratamiento con FGH	122
12	DISCUSION GENERAL	127
12.1	LIMITACIONES DE LAS FUENTES DE AGUA PARA SU TRATAMIENTO DIRECTO CON FILTRACION LENTA EN ARENA	127
12.1.1	Niveles de contaminación que superan la eficiencia	127
12.1.2	Reducción o inhibición de la eficiencia	127
12.1.3	Reducción de las carreras de filtración	128
12.2	EFICIENCIAS PARCIALES DE LAS ETAPAS DE PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO	129
12.2.1	Primera etapa de pretratamiento	130
12.2.2	Segunda etapa de pretratamiento	139
12.2.3	Unidades de filtración lenta en arena	140
12.3	APLICACION DE LOS CONCEPTOS DE MULTIBARRERA Y DE TRATAMIENTO INTEGRADO	145
12.3.1	Plantas a escala piloto	145
12.3.2	Plantas a escala real	146
12.4	COMPARACION Y SELECCION DE ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO	147
12.4.1	Con base en el riesgo sanitario y la eficiencia de remoción	147
12.4.2	Con base en cosideraciones preliminares sobre costos	147
12.4.3	Con base en cosideraciones preliminares sobre operación y mantenimiento	150
12.5	CRITERIOS DE COMBINACION EN ARMONIA CON EL RIESGO SANITARIO DE LA FUENTE	150
12.5.1	Fuente superficial del valle	151
12.5.2	Fuentes superficiales de ladera	153
12.6	CONCLUSIONES SOBRE COSTOS DE CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO	155
13	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	159
13.1	CONCLUSIONES GENERALES	159
13.2	CONCLUSIONES ESPECIFICAS	161
13.3	RECOMENDACIONES	162
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	166

## ANEXOS

1	ILUSTRACION DE ALGUNOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO	A-1-1
2	ESQUEMAS DE LAS PLANTAS A ESCALA REAL	A-2-1
3	CORRELACION ENTRE LA TECNICA GRAVIMETRICA Y FOTOMETRICA PARA SOLIDOS SUSPENDIDOS	
4	MANEJO DE LA INFORMACION	A-4-1
5	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS ETAPAS INTERMEDIAS DE LOS FILTROS GRUESOS DE LAS PLANTAS PILOTO (PERIODO I A IV) Y DE LAS PLANTAS A ESCALA REAL	A-5-1
6	SOLIDOS ALMACENADOS EN LECHOS DE ARENA Y GRAVA Y ANALISIS MICROBIOLOGICO EN LECHOS DE ARENA PERIODO I	A-6-1
7	SILT TEST	A-7-1

## INDICE DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 2.1	Componentes básicos de una unidad de Filtración Lenta con control a la entrada. 6
FIGURA 4.1	Galería de infiltración. (a) sin modificar el gradiente de flujo (Smet et al, 1989) y modificado (b). (Salazar, 1980). 18
FIGURA 4.2	Esquema de un Filtro Grueso Dinámico. 20
FIGURA 4.3	Esquema de un Filtro Grueso de Flujo Descendente en Serie. 22
FIGURA 4.4	Válvula de apertura rápida. versión peruana (a), versión colombiana (b). (Wolters et al, 1989). 22
FIGURA 4.5	Esquema de Filtros Gruesos Ascendentes en Capas, (a) y en Serie (b). 24
FIGURA 4.6	Esquema de un Filtro Grueso Horizontal. 25
FIGURA 4.7	Combinación de alternativas o etapas de pretratamiento y tratamiento que permiten la operación de la desinfección terminal como barrera de seguridad. 27
FIGURA 6.1	Localización de Colombia, el departamento del Valle del Cauca y la ciudad de Cali, sede de CINARA. 30
FIGURA 6.2	Precipitación media (mm/año) en la cuenca del alto Cauca. 32
FIGURA 6.3	Niveles de turbiedad (UNT) (a) y Coliformes fecales (b) para tres fuentes superficiales. 32
FIGURA 6.4	Localización e infraestructura de CINARA en Meléndez - Universidad del Valle y en Puerto Mallarino - Empresas Municipales de Cali EMCALI. 34
FIGURA 6.5	Localización de la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de CINARA, en predios de la Planta de Potabilización de Puerto Mallarino, EMCALI. 34
FIGURA 6.6	Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología. CINARA - Puerto Mallarino. Cali, Colombia. 35
FIGURA 7.1	Diagrama de flujo del sistema de Unidades de Prueba de la Fase I del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I. 38
FIGURA 7.2	Perfil hidráulico de la línea con FGAS. 39
FIGURA 7.3	Diagrama de flujo del sistema de Unidades de Prueba de la Fase I del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III Y IV. 45
FIGURA 7.4	Localización en el Valle del Cauca de los siete sistemas de abastecimiento que incluyen tratamiento con unidades de FLA y pretratamiento con diferentes alternativas de filtración gruesa. 50
FIGURA 7.5	Planta de Potabilización con Filtración Lenta en Arena, Filtración Gruesa Ascendente en Capas y Filtro Grueso Dinámico. Colegio Colombo Británico Cali. 50

FIGURA 9.1	Flujo de información Proyecto Integrado de Investigación y Demostración de Métodos de Pretratamiento para Sistemas de Abastecimiento de Agua.	57
FIGURA 9.2	Esquema General de la Base de Datos. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	58
FIGURA 11.1	Promedios diarios de turbiedad en el río Cauca. Enero a Diciembre de 1990. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	63
FIGURA 11.2	Caracterización horaria del agua cruda. Río Cauca. Marzo 26, 27 y 28 de 1990. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	64
FIGURA 11.3	Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	66
FIGURA 11.4	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	71
FIGURA 11.5	Sólidos Suspendidos y Turbiedad en el afluente de los FLA (a) y Carreras de filtración de los FLA (b). Plantas Piloto. Periodo I.	75
FIGURA 11.6	Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II	77
FIGURA 11.7	Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III	79
FIGURA 11.8	Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real, en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.	
FIGURA 11.9	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.	84
FIGURA 11.10	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III.	88
FIGURA 11.11	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.	92
FIGURA 11.12	Coliformes fecales (UFC/100 ml). Plantas Piloto. Línea con FGAS. Periodo II. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	100
FIGURA 11.13	Piezómetros en el lecho filtrante de FGAS 1 Y FGAC. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	101
FIGURA 11.14	Pérdidas de carga acumuladas y Porcentaje de acumulación a través del lecho filtrante FGAS1, FGAC y FGDS1. Carrera 6. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	102
FIGURA 11.15	Pérdidas de carga acumuladas y Porcentaje de acumulación a través del lecho filtrante FGAS1, FGAC y FGDS1. Carrera 14. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	103

FIGURA 11.16	Porcentaje de Pérdida de carga antes y después del lavado. FGAC. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.	104
FIGURA 11.17	Pérdida de carga máxima (a) y mínima (b). Primeras etapas de Pretratamiento, Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	105
FIGURA 11.18	Sólidos Suspendidos en el afluente de los FLA (a) y carreras de filtración en los FLA (b). Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	106
FIGURA 11.19	Piezómetros en el lecho filtrante de los FLA. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II, III y IV.	106
FIGURA 11.20	Pérdida de Carga en el lecho filtrante del FLA1. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II (a) y III (b).	107
FIGURA 11.21	Promedio de parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Oct 1990 - Julio 1992.	109
FIGURA 11.22	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real, Plantas a Escala Real con FGAS. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	124
FIGURA 11.23	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real, Plantas a Escala Real con FGAC. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	129
FIGURA 11.24	Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad y Color Real, Plantas a Escala Real con FGH. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	134
FIGURA 12.1	Planta de tratamiento con base en la combinación de varias etapas de filtración y en la desinfección como barrera de seguridad	129
FIGURA 12.2	Turbiedad remanente después de pasar muestras de agua por filtros de membrana de diferentes tamaños.	130
FIGURA 12.3	Comportamiento de la planta de El Retiro frente a valores altos de turbiedad. Julio 31 de 1991.	143
FIGURA 12.4	Comportamiento de los sistemas de pretratamiento frente a valores altos de turbiedad en el río Cauca. Plantas Piloto. Mayo 2-9 de 1991.	143
FIGURA 12.5	Diagrama preliminar para combinación de las alternativas de pretratamiento con filtración lenta en arena, en fuentes superficiales de valle dependiendo del riesgo sanitario en la fuente	154
FIGURA 12.6	Diagrama preliminar para la combinación de las alternativas de pretratamiento con filtración lenta en arena, en fuentes superficiales de ladera	156
FIGURA 12.7	Comparación de costos de inversión entre plantas convencionales y plantas con filtración lenta en arena. Colombia. Semptiembre 1987.	157

## INDICE DE TABLAS

	Pág	
TABLA 2.1	Criterios de diseño recomendados para unidades de Filtración Lenta en Arena (Pyper et al, 1991)	7
TABLA 2.2	Eficiencias típicas de tratamiento para Filtros Lentos en Arena (Ref: Bellamy et al.,1985; Ellis, 1985; Huck, 1987; Hrubec et al., 1991; Hoarhoff, 1991)	8
TABLA 2.3	Algunos límites de calidad de Agua para evaluar posible tratamiento directo con unidades de Filtración Lenta en Arena.	14
TABLA 4.1	Criterios preliminares de diseño de los Filtros Gruesos Horizontales. (Wegelin, 1989).	26
TABLA 7.1	Frecuencias y Puntos de Muestreo para Análisis de Calidad de Agua. Platas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	40
TABLA 7.2	Parámetros de diseño y especificaciones de lechos filtrantes de las plantas piloto del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	42
TABLA 7.3	Criterios de mantenimiento de las unidades de prueba del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	43
TABLA 7.4	Frecuencias y puntos de muestreo para análisis de calidad de agua. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	46
TABLA 7.5	Parámetros de diseño y especificaciones de los lechos filtrantes de las Plantas Piloto del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	47
TABLA 7.6	Criterios de Mantenimiento de las Unidades de Prueba del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II, III y IV.	48
TABLA 7.7	Información técnica sobre los sistemas a Escala Real. (Fuente CINARA 1992).	49
TABLA 7.8	Frecuencia y puntos de muestreo para análisis de calidad de agua Plantas a escala real. Sur de Cali. Proyecto PRETRATAMIENTOS. (Octubre de 1990 - Julio de 1991).	51
TABLA 7.9	Frecuencia y puntos de muestreo para análisis de Calidad de Agua. Plantas a escala real. Norte del Valle del Cauca. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	52
TABLA 8.1	Parámetros de calidad de agua medidos en el Proyecto.	54
TABLA 10.1	Cronograma General de Actividades. Proyecto PRETRATAMIENTOS.	62
TABLA 11.1	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	66
TABLA 11.2	Remoción de turbiedad y sólidos suspendidos. Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	67

TABLA 11.3	Remoción de color real y coliformes fecales. Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	67
TABLA 11.4	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	68
TABLA 11.5	Remoción de Sólidos Suspendidos (mg/l), Turbiedad (UNT), Color Real (UPC), Coliformes Fecales (UFC/100 ml). Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	73
TABLA 11.6	Duración de Carrera y Pérdida de Carga Hidráulica. Líneas de Tratamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.	74
TABLA 11.7	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.	77
TABLA 11.8	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III.	79
TABLA 11.9	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.	81
TABLA 11.10	Remoción de turbiedad y sólidos suspendidos. Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	83
TABLA 11.11	Remoción de color real y coliformes fecales Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	83
TABLA 11.12	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.	84
TABLA 11.13	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III.	88
TABLA 11.14	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.	92
TABLA 11.15	Duración de carrera y pérdida de carga hidráulica. Líneas de tratamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II, III y IV.	99
TABLA 11.16	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas a escala real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	110
TABLA 11.17	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las líneas con FGAS. Plantas a escala real. Parcelación Cañas Gordas, La Marina y Célylan. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	112
TABLA 11.18	Parámetros hidráulicos en Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo Octubre 1990 a Julio de 1991.	116

TABLA 11.19	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las líneas con FGAC. Plantas a escala real. Parcelación el Retiro y Colegio Colombo Británico. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	118
TABLA 11.20	Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las líneas con FGH. Plantas a escala real. Universidad Javeriana y CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	123
TABLA 12.1	Remoción de Sólidos Suspendidos en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	131
TABLA 12.2	Remoción de Turbiedad en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	132
TABLA 12.3	Remoción de Color Real en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	133
TABLA 12.4	Remoción de Coliformes Fecales en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.	134
TABLA 12.5	Remoción de Sólidos Suspendidos. Plantas a escala real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	135
TABLA 12.6	Remoción de Turbiedad. Plantas a escala real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	136
TABLA 12.7	Remoción de Color Real. Plantas a escala real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	137
TABLA 12.8	Remoción de Coliformes Fecales. Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.	138
TABLA 12.9	Evolución de las normas para turbiedad del agua potable en EE.UU.	142
TABLA 12.10	Comparación Estadística de los Sistemas de Pretratamiento para Turbiedad. Periodos II, III y IV.	148
TABLA 12.11	Comparación Estadística de los Sistemas de Pretratamiento para Coliformes Fecales. Periodos II, III y IV.	149
TABLA 12.12	Impacto de los Niveles de Turbiedad a la Salida de los Pretratamientos en el Efluente de las Unidades de Filtración Lenta en Arena	152

## PREFACIO

Este documento presenta el conjunto de resultados, obtenidos en desarrollo del Proyecto de Investigación y Demostración de Métodos de Pretratamiento de Agua para Consumo Humano, apoyado financieramente por el Gobierno de Holanda a través del Departamento de Investigación y Desarrollo de Tecnología del Ministerio de Asuntos Exteriores. Este proyecto se enmarca dentro del programa de mejoramiento de la calidad de agua para consumo humano que realiza el gobierno de Colombia y se constituye en respuesta a la necesidad expresa de alternativas tecnológicas confiables y económicamente competitivas para el sector rural y el pequeño municipio.

El Proyecto fue dirigido a nivel nacional por el Ing. Gerardo Galvis, Director del Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua, CINARA, adscrito a la Universidad del Valle y a nivel internacional por el Ing. Jan Teun Visscher del IRC, International Water and Sanitation Centre. En la coordinación de actividades específicas se contó con la participación de los siguientes profesionales: Ingenieros Alberto Galvis, Camilo H. Cruz, Javier Fernández, Jo Smet y Fabiola Berón, Química Pamela Ocampo, Bióloga Neyla Benitez y Estadística Viviana Vargas. Con ellos colaboraron profesionales de las ciencias sociales, junto con tecnólogos, estudiantes, dibujantes y auxiliares.

El Proyecto se benefició de las conversaciones e intercambio de experiencias con profesionales de reconocida trayectoria en el sector de agua potable y saneamiento. Entre ellos: Dr. Barry Lloyd, Dr. Nigel Graham, Dr. Luiz Di Bernardo, Dr. Mauricio Pardon, Ing. Martin Wegelin, Ing. Antonio Castilla, Ing. Jorge Arboleda, Dr. Fred Reiff e Ing. Diego Rengifo.

En desarrollo del Proyecto se recibió apoyo de instituciones de orden internacional como OPS/OMS, IDRC, IRCWD/EAWAG, CEPIS, Robens Institute, Escuela de Ingeniería de Sao Carlos -Universidad de Sao Paulo, Imperial College of Science and Technology - Universidad de Londres, Universidad de Delft y del IHE; y en Colombia instituciones como el Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Salud, Gobernación del Valle del Cauca, Comité Departamental de Cafeteros del Valle del Cauca, Secretarías de Salud y Obras Públicas del Municipio de Cali y ACODAL (Nacional y Seccional Valle del Cauca).

La Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología, en la cual se realiza la investigación con unidades experimentales a escala técnica, tiene sede en predios de las Empresas Municipales de la ciudad de Cali, EMCALI. Un reconocimiento especial se hace a la Gerencia de Acueducto y Alcantarillado y al Departamento de Producción de Agua Potable de EMCALI por el apoyo brindado durante el Proyecto.

Las actividades de investigación con proyectos de demostración a escala real se beneficiaron significativamente del espíritu de trabajo y de colaboración de las organizaciones comunitarias o directivas institucionales, lo mismo que de los operadores de los sistemas en las siguientes localidades: Retiro, Cañas Gordas, Universidad Javeriana de Cali, Colegio Colombo Británico, Corregimientos de Ceylán y la Marina y Concentración Agrícola Julio César Fernández (CIDER) de Restrepo.

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

This report presents a summary of the results of the first phase of a comparative study of different multi-stage water treatment systems. Each of these systems consisted of a combination of two stage roughing filtration and slow sand filtration. This research has been carried out in Colombia in the period 1989 - 1992, in the context of the development and demonstration project on pre-treatment technology. The project was implemented by CINARA, Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua and IRC, International Water and Sanitation Centre, with financial support from the Research and Development Department of the Netherlands Ministry of Foreign Affairs. Inputs were also provided by Colombian institutions including: the National Planning Department, the Ministry of Health, Universidad del Valle, Empresas Municipal de Cali EMCALI, Comité Cafeteros and ACODAL and by international organizations including: WHO, PAHO, CEPIS, IDRC, IRCWD, Robens Institute, University of Surrey, the School of Engineering of Sao Carlos and the University of Sao Paolo.

After a gradual start, in which a research station was established in Puerto Mallarino, Cali, Colombia, the project has developed very well and has been able to demonstrate the vast potential of the combination of two-stage roughing filtration and slow sand filtration. It has proven the feasibility of applying a multi-barrier concept towards water treatment without using chemical coagulants leaving low dose disinfection as a possible final safety barrier. Even if this last barrier fails, still a water low in sanitary risk is being produced. This is very important as chemical water treatment which was sofar the only alternative for highly polluted surface waters, has a poor performance record outside the larger cities and a limited potential particularly for smaller townships. In Colombia, for example, over 40% of the population lives in communities with a population below 12,000. Many of these have to rely on polluted surface water sources. The present coverage with water supply systems of these communities is estimated at 24%. Out of these 30% include some and only 4% include full treatment, which unfortunately seems not very reliable in many cases.

The project results show that this situation can be changed. Although further technical and economical optimization is required, the combination of two-stage roughing filtration and slow sand filtration is a very reliable and effective water treatment which can be managed even by small communities. These findings bring reliable water treatment within reach of many people now having to rely on deteriorating surface water sources. The results also show the importance of the concept of integrated water treatment, which promotes the selection of treatment processes which are complementary (Lloyd et al., 1991). The combination of pretreatment and slow sand filtration, concerns treatment processes with different possibilities and limitations (Figure 1). These processes are complementary and together sufficiently remove the most important contaminants from the surface water. Applying the combination of integrated water treatment and the multi-barrier concept is very promising. It not only increases the reliability of water treatment, but also may considerably reduce cost.

With the potential of pre-treatment technology now fully established indepth research is needed to optimize the technology, improve its design criteria and its operation and maintenance procedures, in order to fully benefit from the potential of this technology at lowest cost.

Another important feature of the project is that it helped to build-up research capacity in Colombia and establish a very good infrastructure for future investigation and technology transfer.

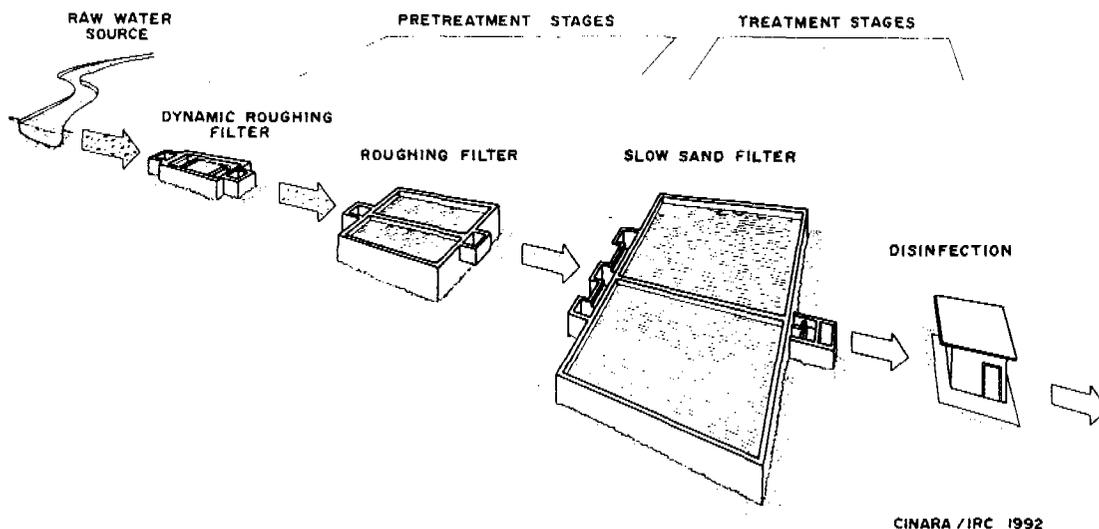


Figure 1: Multi-stage filtration water treatment plant

### Slow Sand Filtration

The research concerns systems which combine slow sand filtration (SSF) with different two-stage roughing filtration alternatives. Experience in several countries has shown that slow sand filtration is a very appropriate water treatment method, which combines simple and low cost operation and maintenance with high removal efficiencies for a wide range of substances (Visscher et al., 1987). In this process water slowly percolates through an emerged sandbed and during its passage impurities and harmful substances are being removed by a combination of filtration, sedimentation and biological and bio-chemical processes. It has a very good performance efficiency, but this not always prove sufficient to cope with the high load in suspended solids and other harmful substances in the water including faecal coliforms and colour, resulting in an effluent not able to meet prevailing water quality criteria. Also its performance me be reduced by low temperature, low nutrient levels and low oxygen levels. Finally a high load of suspended solids, algae proliferation and excess concentrations of iron and manganese may result in very short filterruns. Several authors have established guidelines describing the raw water quality which can be treated by slow sand filters. Although the maximum levels for these parameters still show a considerable range (eg. turbidity levels of 5 - 10 NTU, colour of 5 - 25

TCU, iron and manganese content of 0.3 - 2.0 mg/l and 0.05 - 0.2 mg/l respectively), they are quite low. A reason for this is that they are developed for countries such as the USA where drinking water criteria are very stringent. In less developed countries water quality guidelines are more relaxed, and therefore also water with somewhat higher pollution levels can still be accepted for SSF treatment. Nevertheless, the drawback that SSF alone can cope only with relative clean water has limited the application of this technology.

### **Pre-treatment**

In Europe the limitations presented in slow sand filtration application resulted in the development of pre-treatment techniques which initially were rather simple such as, long term storage and micro straining. Gradually, more complicated systems were put in place prior to slow sand filtration including coagulation, using chemicals, and flocculation followed by sedimentation and rapid sand filtration. These processes however hold little promise for the conditions in most less developed countries. This limitation has revitalized research in other pre-treatment alternatives not requiring the addition of chemicals and simple to operate and maintain. Most of these experiments involve rather small scale pilot plants and in fact only limited data are presented in literature and no evidence was found of comparative research of the different techniques. The experiments reported in literature focus particularly on the removal of suspended solids, some using kaoline suspensions, and the performance of the systems is mostly being explained on the basis of sedimentation theory.

Experiments with small roughing filters in Colombia treating different types of surface water showed that next to suspended solid removal also good reduction in coliform counts and in true colour was obtained (Galvis and Visscher, 1987). These first results and the findings presented in literature triggered the construction of a small number of full scale plants in Valle del Cauca, Colombia, comprising both slow sand filters and pre-treatment units mostly build to very conservative design criteria and treating water from rivers with low or moderate pollution levels.

The positive results obtained in the pilot plants, the need to cope with water quality deterioration due to soil erosion and expansion of human activities and the decision of national and international organizations to promote water supply pressure in the region Valle del Cauca to provide better water quality to the population resulted in the initiation of a comparative research project. This research comprised: i) a comparison at technical scale of five different treatment systems in the research station in Puerto Mallarino each comprising two-stages of roughing filtration, followed by slow sand filtration and ii) performance monitoring of full scale water treatment plants operated and maintained by local caretakers under supervision of community-based organizations.

### **The first research period**

The project went through a first period of seven months, in which the selected systems were put to the test. These systems were build to design criteria resulting

from a broad literature review and field experience in Cali. This phase proved to be very important to get a good idea about the performance of the systems and adjust the research programme. It also allowed to gradually establish the research team and create a format for the computerized data base. The results in this period were already quite good and demonstrated the importance of the biological activity in the roughing filters. Nevertheless with average faecal coliform counts between 56 and 213 per 100 ml, the quality of the treated water from the systems under test, still was rather far outside the water quality standards in Colombia. Furthermore, the filterruns in the slow sand filters were rather short, ranging from 8 - 30 days.

### **Establishment of the subsequent research periods**

To overcome the problems indicated above a number of changes were made in the research plant. Dynamic roughing filtration was adopted as the first pre-treatment step as this gave much better results to remove suspended solids than plain sedimentation and tilted plate settling. Essentially, this first step is meant to remove coarse suspended material at low cost, therefore a low retention time of less than one hour was applied.

Furthermore finer filter media was allocated in the subsequent roughing filters and one treatment line was added including a modified horizontal roughing filter with a shorter retention time. Finally the filtration rate was reduced in the second period from 0.6m/h to 0.3 m/h and gradually increased again in period III and IV to the initial rate of 0.6m/h. At present the rate has been even further increased to 0.75m/h still providing good results, showing the potential for further optimization.

### **Description of the test plant**

The systems tested in the subsequent periods thus comprised a dynamic roughing filter, an upflow, a downflow or horizontal flow roughing filter and a slow sand filter as outlined in Figure 2.

The dynamic roughing filter (DyRF), comprises a thin layer of fine gravel on top of a shallow bed of coarse gravel with a system of underdrains. The water entering the unit passes over the gravel bed and part of it is drained through the bed to the next treatment unit, the other part is returned to the river. The filter works primarily as a surface roughing filter. Under normal conditions the unit will gradually clog and will need a simple cleaning every week. When peak loads of suspended solids are received, clogging will go much quicker and will reduce the water volume flowing to the subsequent treatment units, thus protecting the total treatment plant. This is the more important as most of the rivers in the Andean region have considerable peaks in turbidity but usually of short duration.

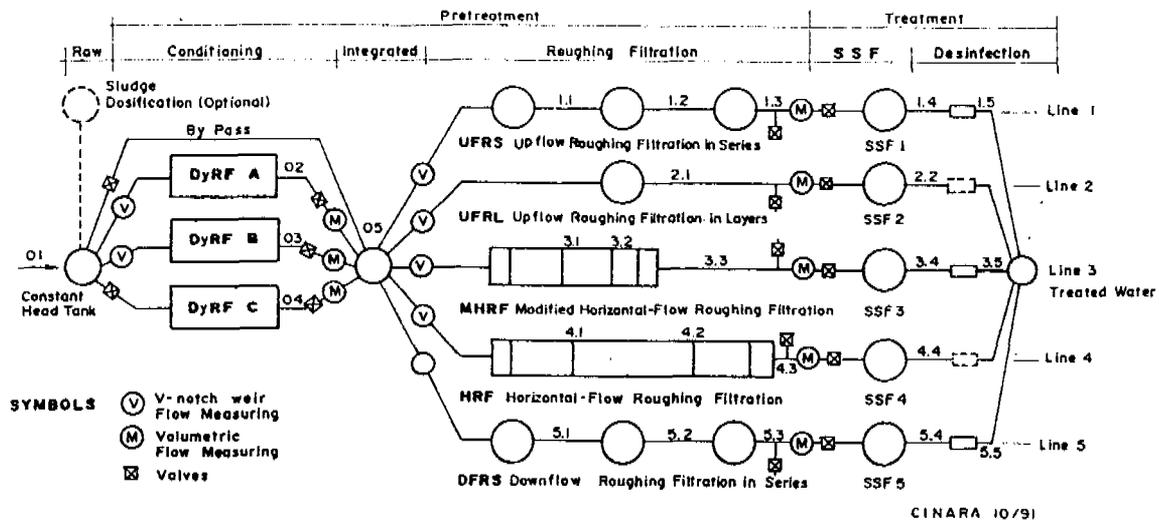


Figure 2: Schematic flow diagram of the test plants

Two types of upflow roughing filters are tested: i) Upflow Roughing Filtration in Series (URFS), a system of three units operated in series with the first unit filled with coarse gravel, the second with medium size gravel and the third with fine gravel, and ii) Upflow Roughing Filtration in Layers (URFL), a system comprising only one unit filled with layers of gravel of different size ranging from coarse at the bottom to fine at the top. Upflow roughing filtration, which so far has had limited application in the world, has the advantage that the first filtration occurs at the bottom of the filter. This facilitates the removal of deposits from the gravel by draining the units through a system of underdrains.

One type of downflow roughing filtration is tested, Downflow Roughing Filtration in Series (DRFS) which consists of three units operated in series, each comprising gravel of different size similar to the upflow filters. This type of system has been researched somewhat more widely in different parts of the world and particularly in Perú.

Two types of horizontal-flow roughing filters were tested, one Standard Horizontal Roughing Filter (HRF) comprising three compartments filled with the same gravel sizes as the upflow and downflow units and build to the design criteria proposed by Wegelin (1986) and one Modified Horizontal Roughing Filter (HRFM) filter which includes a drainage system to facilitate cleaning and comprises shorter compartments to bring the theoretical hydraulic retention time at the same level as of the upflow and downflow systems in series, thus making the systems competitive.

Each line includes at the end a slow sand filter, filled with a sand layer of 1.0 metres depth. The sand has an effective diameter of 0.2 mm and a uniformity coefficient of

1.57. During the research period reported here, this layer was gradually reduced due to subsequent scrapings, but never fell below 0.6 m even in the filter which needed most scraping. To date the research is being continued and with sand levels now even as low as 0.45 m still excellent effluent is being obtained from the slow sand filters, which holds a promise for further cost savings.

All units are made of ferro-cement and are circular in shape with a diameter of 2.0 m and a height of 2.0 m. The horizontal roughing filter is built in brickwork and is 1.2 m high, 1.2 m wide and 8 m long including the inlet and outlet structure. The modified horizontal filter has the same dimensions but a length of 5 m. Summary data on all systems are presented in Table 1.

Three six month test periods have been carried out with flow velocities of respectively 0.3, 0.45 and 0.6 m/h in the roughing filters and after the period reported here, this rate has been increased to 0.75 m/h. A wide range of parameters were measured in the research including: turbidity, true colour, suspended solids, settleable solids, pH, dissolved oxygen, alkalinity, total hardness, total iron, manganese, COD, faecal coliforms and faecal streptococci.

Table 1: Technical characteristics of the treatment systems in the research station

	DYRF	URFL	URF and DRF			HRFM			HRF		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
Surface Area (m <sup>2</sup> )	0.75/2	3.14	3.14	3.14	3.14	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
Gravel depth											
19 - 25 mm		0.30	0.30	0.15							
13 - 19 mm	0.20	0.30	1.25	0.15	0.10	2.06			3.27		
6 - 13 mm	0.20	0.30		1.25	0.10		1.14	0.10		2.32	
3 - 6 mm	0.20	0.30			0.67			0.60			1.00
1.6 - 3 mm		0.35			0.68			0.55			0.55
Effective depth	0.60	1.55	1.55	1.55	1.55	2.06	1.14	1.25	3.27	2.32	1.55

### Description of full scale plants

In parallel with this research, seven community managed full scale treatment plants comprising roughing filters and slow sand filters have been monitored (Table 2). Most of these plants were built using very conservative design criteria because of the lack of data available in the literature, scarce information on raw water quality and limited experience of the CINARA team. Two plants very near to the CINARA office however were built to less conservative design criteria, as they could be monitored and controlled more easily.

Table 2: Some key characteristics of the full scale plants all treating water from highland rivers

TREATMENT	ROUGHING FILTERS			SLOW SAND FILTERS		
	FLOW (l/s)	GRAVEL BED TYPE	LENGTH (m)	SIZE RANGE (mm)	FILTRATION VELOCITY (m/h)	RATE (m/h)
CEYLAN	9.4	URFS	2.08	25-3	0.70	0.14
EL RETIRO	8.8	DyRF URFL	0.3 0.7	4-25 25-3	1.5 0.70	0.15
COLOMBO	0.7	DyRF URFL	0.6 1.2	6-25 25-4	1.5 0.60	0.11
RESTREPO	0.7	HRF	7.0	16-5	0.80	0.15
JAVERIANA	1.5	DyRF HRF	0.6 4.0	4-25 16-3	0.75 1.00	0.08
LA MARINA	7.9	URFS	2.0	25-3	0.90	0.16
C. GORDAS	8.6 2	DyRF URFS	0.6 1.8	7-25 25-3	10.20 0.70	0.16

### Quality of the raw water sources

The full scale plants and the research station are located in different places and together cover a range of raw water qualities (Figure 3). The full scale plants draw water from highland rivers with low or moderate pollution levels and the research station draws water from a highly polluted lowland river, which receives both water from the highland rivers and untreated sewage from small and large settlements.

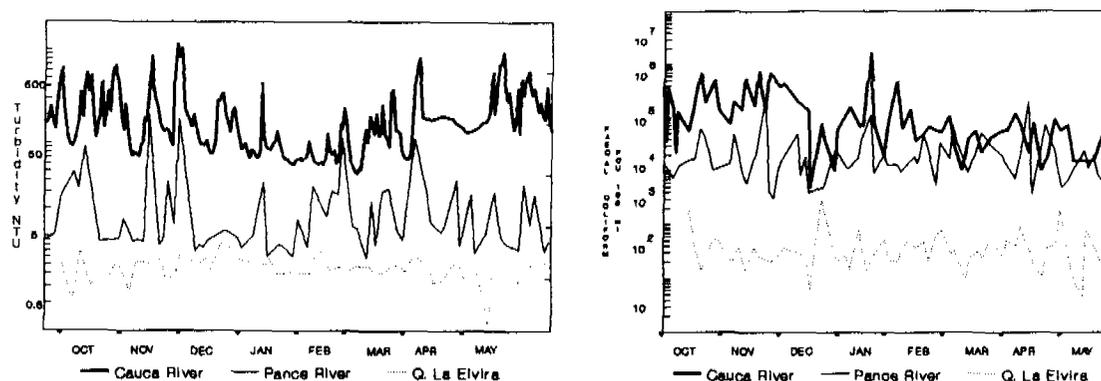


Figure 3: Indication of water quality of different rivers included in the research programme

The highland rivers have average turbidity levels ranging from 2.5 to 20 NTU with peaks ranging from 20 to 180 NTU, faecal coliform counts range from 368 to 26,000 with peaks between 2,600 and 228,000. The lowland river has periods with average turbidity levels over 150 NTU, faecal coliform counts over 100,000 per 100 ml and colour over 60 TCU. After rains the water quality deteriorates further, developing peak turbidity lasting several hours with values sometimes over 3000 NTU. When applying the classification of microbiological quality proposed to WHO and UNEP (Lloyd et. al. 1991) all but one of the raw water sources included in the research fall in the worst category (E), which implies a very high sanitary risk.

The raw water quality is influenced by the climate, in which rainy periods and dry periods exist (Figure 4). Furthermore steep changes in water quality are being observed, but usually of short duration (Figure 5). The temperature of the water is rather constant with averages ranging from 18 to 23 °C with standard deviations around 3 °C.

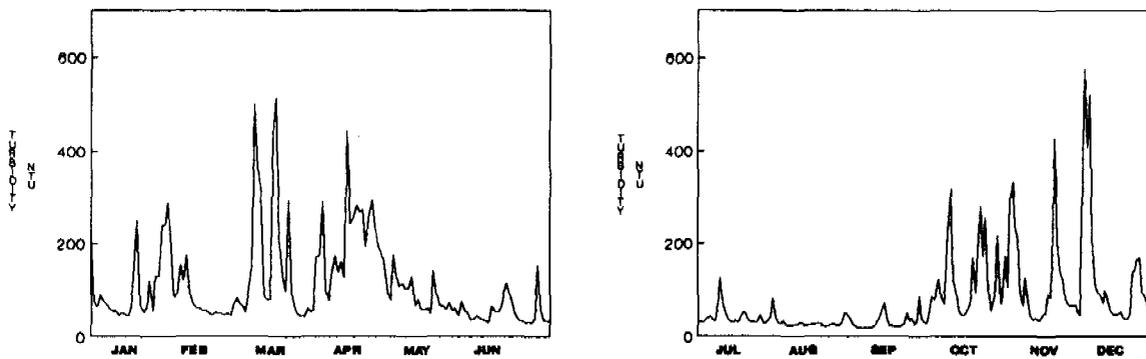


Figure 4: Raw water quality of Cauca river, period (January-December 1990)

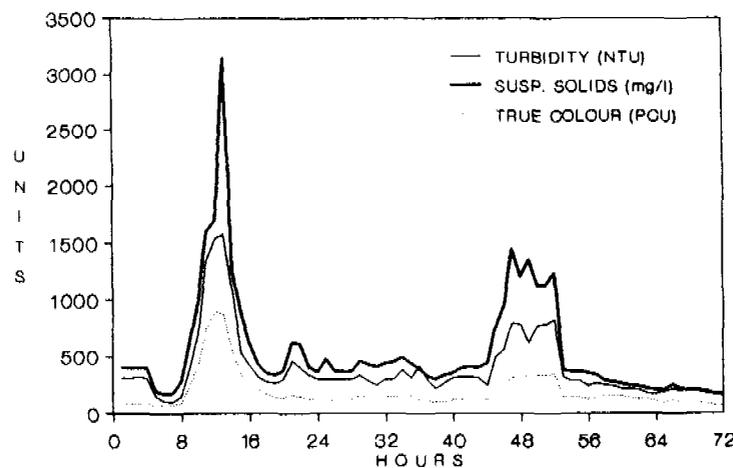


Figure 5: Abrupt water quality changes in Cauca river

## Overall performance of the treatment combinations

The overall performance of the treatment lines which are being compared in the research station in Puerto Mallerino has been even better than expected. This not only concerns the removal of suspended solids, but particularly the bacteriological quality improvement and the removal of other impurities (Figures 6 and 7).

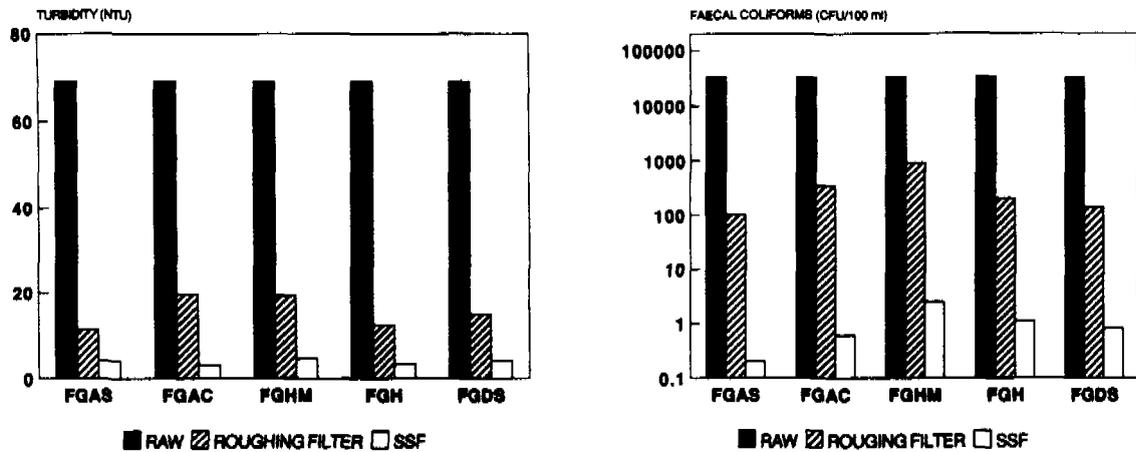


Figure 6: Average effluent turbidities and faecal coliform counts of the different treatment units (Jan.-July 1991)

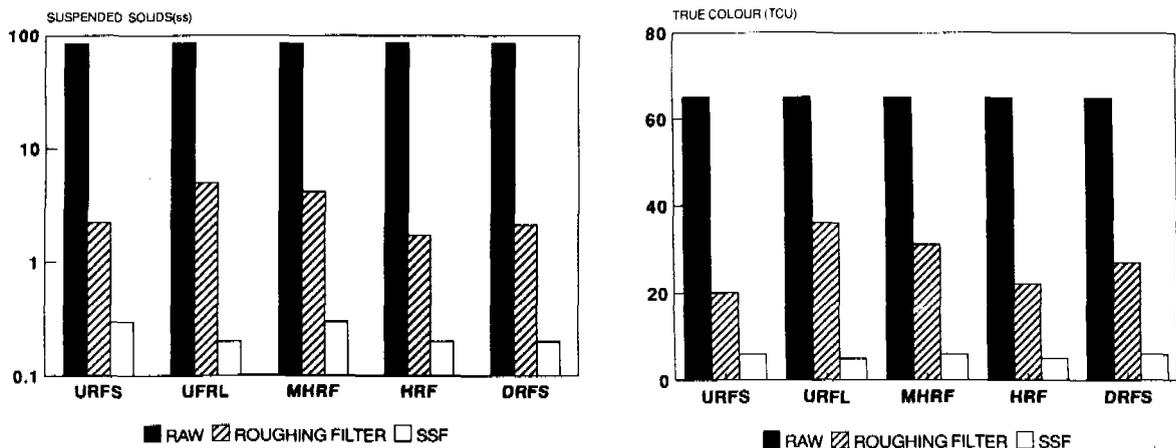


Figure 7: Suspended solids and average colour levels in the effluent of the different treatment units (Jan. - July 1991)

The combination of two-stage roughing filtration and slow sand filtration for example proved capable of consistently bringing about a reduction in faecal coliforms between 4.0 and 5.6 logarithmic units (99.9911 - 99.9980%), which is well above the figures indicated in the literature. But also good removal was obtained for other parameters including suspended solids (99.7 - 99.9%), turbidity (94.4 - 97.5%) and true colour (77.1 - 93.0%).

The systems also proved to be able to cope with short steep changes in water quality, using turbidity as an indicator. Peaks of longer duration were also very much reduced, but did result in a gradual deterioration of the effluent. This point needs further research to explore what adjustments can be made to the units in case longer periods of high turbidity or other impurities have to be coped with.

### Monitoring of full-scale plants

Monitoring of seven community-managed full-scale plants confirmed the research findings obtained in Puerto Mallarino. With average inflow turbidities ranging from 3 to 20 NTU average effluent turbidities varied from 0.4 to 1.0 NTU. With inflow peaks over 180 NTU, the outflow remained consistently below 2 NTU. This is better than the data reported by Slezak et al. (1984), on 27 SSF plants in the USA, treating water with average turbidities of 0.4 - 10 NTU producing effluent values between 0.08 and 2.5 NTU.

Average turbidity removal efficiencies in the seven plants ranged from 80 to 96%. Similar findings were obtained for average removal efficiencies for suspended solids (93 to 99% with average value in effluent below 0.3 mg/l, true colour (60 to 87%, with average in the effluent below 6 TCU) and faecal coliforms (99.788 to 99.9985% with average effluent value below 1 FC/100ml). Figure 8 shows that the treatment processes adapted to the concentration of impurities in the raw water. Better removal efficiencies were obtained for higher contamination levels. In Ceylan the average removal of faecal coliform bacteria is 2.8 log units. In the Colombo plant, which receives more contaminated water, this is 4.8 log units. The data obtained indicate that all these plants which are being operated by caretakers from the community, consistently produce water within the water quality standards prevailing in Colombia, except for the occasional occurrence of a very low number of faecal coliforms in the effluent.

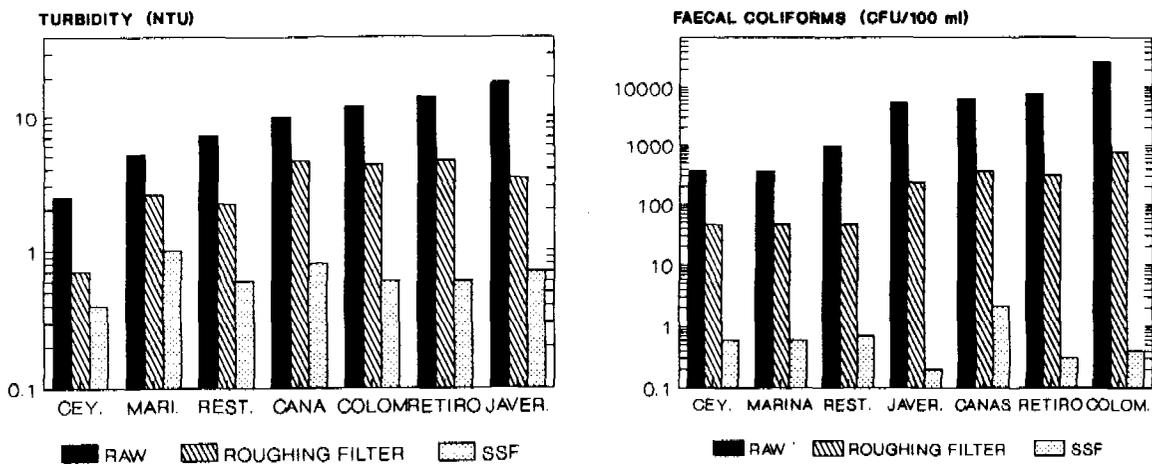
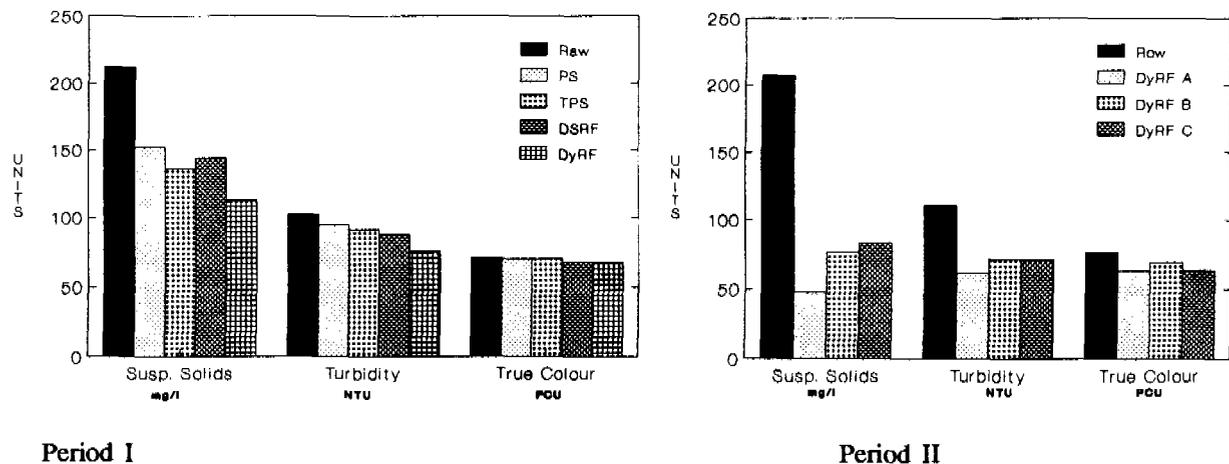


Figure 8: Performance results of several full scale plants

## Performance of the dynamic roughing filters

The dynamic roughing filter being the first treatment step plays a very important role and holds a lot of promises for further cost savings. Figure 9 provides data from the first research period showing that the dynamic roughing filter gave better results in suspended solid removal than the plain sedimentation units and the tilted plate settlers. Removal efficiencies in the subsequent three periods are consistently good, between 57 and 80% in for average suspended solid loads in the raw water of 60 - 190 mg/l. These units also significantly reduce faecal coliform counts (33-78%), iron (46-75%) and manganese (52-60%) but have less impact on turbidity (36 - 45%) and much less on colour figures (11 - 17%). The fact that suspended solid loads are reduced to a higher extent than turbidity clearly shows that particularly coarser suspended material is being removed in the dynamic roughing filters. The results in Puerto Mallarino, are consistent with the findings resulting from the monitoring of the full scale systems treating water with low suspended solids concentrations (average values ranging between 10 and 16 mg/l) with removal efficiencies of 58 - 77% at flow velocities of 1.5 m/h and turbidity removal efficiencies between 44 and 49%. In one system operating at 10.2 m/h suspended solid removal reached only a level of 31%.



Period I

Period II

PS = Plain sedimentation      DSRF = Downflow shallow roughing filtration  
 TPS = Tilted plate settlers      DyRF = Dynamic Roughing Filtration

Figure 9: Average levels of different contaminants in raw water and effluent of dynamic roughing filters and other conditioning processes

## Performance of the second stage roughing filters

A comparison of the different roughing filtration alternatives gives very interesting results. For turbidity removal, efficiencies between 54 and 83% were obtained in Puerto Mallarino, with best results for URFS and HRF, closely followed by DFRS. For the below 50 NTU turbidity range however all systems produce effluent values below 10 NTU except for the URFL, the alternative with lowest cost, which in period

III reached upto 12 NTU. Whereas 10 NTU is recommended by different authors as an acceptable influent for a slow sand filter, based on the very stringent water quality standards in the USA. In developing countries drinking water quality guidelines however are less stringent, so slightly higher inflow turbidities can also be accepted, making the URFL also a viable alternative.

Removal of suspended solids was ranging from 84 - 98% again with the higher efficiencies for URFS, HRF and DRFS. but with the effluent remaining below 5mg/l for influent values below 187 mg/l. For removal of faecal coliform bacteria with influent values over 89,000, efficiencies ranged between 93.7 and 99.7%. For true colour removal they were lower but still ranged between 28 and 69% which are findings which sofar have not been reported in literature. The efficiencies were hardly affected by the increase in filtration rate, nor did water quality changes in the influent have a major impact. The best results were obtained with URFS, HRF and DRFS, the systems with longer retention times, but results with URFL and HRFM were still quite good. The somewhat lower efficiency of the URFL is easily explained by the much shorter length of the gravel of 1.55 m. The less good results of the HRFM, although having a length of 4.35 m is very likely due to poor hydraulic performance of the unit. A similar tendency as observed for coliform removal and colour presents itself for faecal streptococci and Iron and Manganese removal.

Although the performance of the process in the roughing filters is very good, the combination of mechanisms is not yet fully understood. For example, headloss development was measured in the different units resulting in different profiles which need further study and clarification. This be of importance to better understand and predict the performance of the different processes, which is essential to make design improvements and to develop the most suitable cleaning procedures.

The roughing filters in the full scale plants, all treating water with lower turbidity levels than the systems in Puerto Mallarino, showed lower removal efficiencies ranging from 30 - 72%, but all producing an effluent below 5 NTU. Also coliform counts in the raw water of the full scale plant are less, and removal efficiencies somewhat lower, ranging from 78 to 95%. True colour levels in the raw water were also lower and removal efficiencies ranged between 17 and 45%. The effluent of all pre-treatment units was sufficiently good that it could very well be treated with SSF.

### **Performance of the slow sand filters**

The removal efficiencies of the slow sand filters have been similar to values reported in literature, but in the first research period, the pre-treated water was of rather poor quality leading to high levels of particularly suspended solids and in relative short filterruns between 8 and 30 days. Modifications in the pre-treatment systems in the subsequent periods resulted in lower levels of suspended solids and much better influent quality for the slow sand filters, resulting in longer filterruns between 30 and 55 days in period II (filtration rate of 0.1 m/h) to 30 to 35 in period IV (filtration rate 0.15 m/h) (Figure 10).

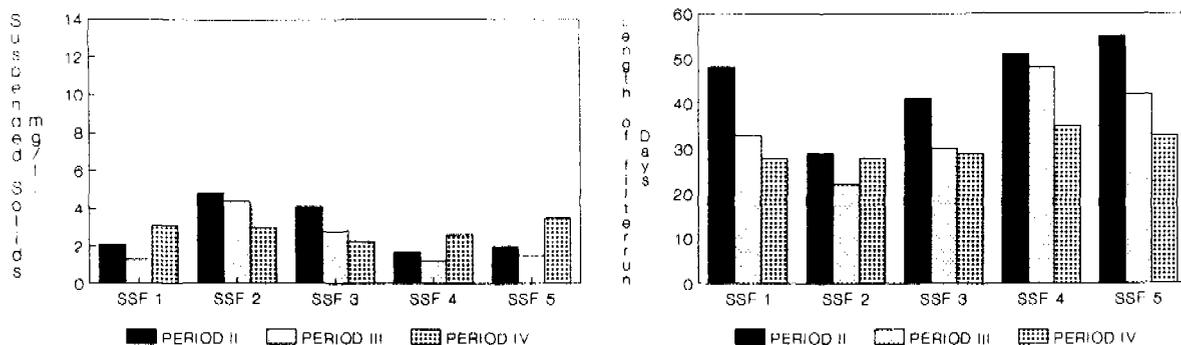


Figure 10: Graphic presentations of average loads of suspended solids in SSF influent and length of filterruns

The filterruns in the slow sand filters included in the full scale plants, varied between 2.5 and 7 month, with filtration rates around 0.15 m/h. These units received water with turbidity values ranging from 0.7 to 4.6 NTU and produced effluents ranging from 0.4 to 1.0 NTU. Only one plant had a shorter filterrun of 1 month, probably due to algae problems.

### Conclusions and Recommendations

The research results clearly show the potential of combining two-stage roughing filtration with slow sand filtration to treat water from different Andean rivers and are also promising for other regions in the world. Although all rivers contain water which falls in category E, the highest pollution category established by WHO and UNEP, water of very low sanitary risk was produced consistently by the treatment systems falling in category A (0 faecal coliforms/100 ml) or B(1-10 faecal coliforms/100 ml). The monitoring of seven full-scale community water supply plants which are operated by local caretakers, shows that a satisfactory effluent can be produced consistently without the addition of chemicals.

The microbiological and physico-chemical improvements brought about by the processes are considerably better than thought possible on the basis of the review of literature. More importantly the results clearly show the possibilities to introduce a multi-barrier concept to integrated water treatment without adding chemical coagulation. This is particularly so because the systems show higher removal efficiencies when the raw water quality is lower and thus presents a higher sanitary risk.

Two-stage roughing filtration vastly enhances the potential application of slow sand filtration and the combination fits very well in the concept of integrated water

treatment as the processes are complementary in the removal of different contaminants. Roughing filtration helps to reduce the load in suspended solids and creates an essential additional barrier against the transmission of disease carrying organisms and other harmful substances in the water. Having overcome the combination of high and fluctuating levels of faecal contamination, suspended solid loads, turbidity, true colour, iron and manganese, a very low dose disinfection stage could be introduced wherever it could be accepted and sustained at local level (Galvis 1992).

The dynamic roughing filter provides a very good first step in the treatment process at very low cost, on average less than 5% of the capital investment in the treatment plant. It plays a very important role as first treatment step were it contributes to the removal of different substances including suspended solids, micro-organisms, iron and manganese. Further improvement of this step is advisable as this may strongly contribute to the overall optimization of the subsequent treatment processes.

The different roughing filtration alternatives compared in Puerto Mallarino, all performed very well. It was clearly shown that they not only have a great capacity to remove suspended solids and turbidity, which has been the main reason for their development, but equally or maybe even more important is their potential to reduce faecal coliform counts, iron and manganese levels and colour figures. The removal efficiencies for all systems were not very much affected by the gradual increase in filtration rate from 0.3 to 0.6 m/h, which seems to imply that further optimization is possible. The treatment results in the full scale plants confirm the findings in the research station, although removal efficiencies were somewhat lower, which are in line with the lower contamination in the raw water sources from which these plants draw their water. Further optimization of both the units in the research station and the full scale can be obtained as all systems have been over designed due to the very limited availability or complete absence of design criteria in literature.

On the basis of a statistical analysis, URFS, DRFS and HRF provide comparable results, which are slightly better than the other two alternatives URFL and HRFM. However when taking into account the depth/length of the gravel bed, the URFL presents the cheapest alternative for the less and the URFS and DRFS for the more polluted water sources. When also following the present experience that upflow systems are more easy to clean the prime emphasis goes to the URFL and URFS.

Preliminary guidelines can be established on the basis of this first comparative research in roughing filtration alternatives. These concern roughing filters with design criteria as indicated in Table 1 and operating at a flow velocity of 3m/h for DyRF and 0.6 m/h for the other roughing filter systems and 0.15 m/h for SSF.

- For relative clean water sources, below 10 NTU in turbidity and 500 Faecal coliforms/100ml, a combination of DyRF and SSF would be appropriate.

- For highland rivers having limited changes in water quality and of short duration DyRF, URFL and SSF is a good combination upto 100 NTU and 10,000 FC/100ml.
- For lowland rivers with stronger water quality variations of longer duration, DyRF, URFL and SSF is a good combination upto 50 NTU and 50,000 FC/100ml and the combination DyRF, URFS and SSF is good upto 100 NTU and 120,000 FC/100ml
- For more contaminated water sources the systems under study still provide a good potential, but the present research findings do not permit firm recommendations for these situations implying that for the time being on-site pilot plant testing will be needed to explore which performance may be expected. This will depend amongst others on the type of suspended solids and their particle size distribution which needs more study then sofar has been possible in the research carried out sofar.

It is presently being looked into if similar criteria can also be established for some of the other parameters measured in the research including true colour, iron and manganese, by carrying out statistical analyses of the data incorporated in the data base.

The research results provide a very good starting point for designing suitable multi barrier water treatment systems for the majority of raw water conditions prevailing in Colombia and other countries without the need to use chemicals. The research findings show the need to take into account both the multi-barrier concept and the concept of integrated water treatment. This implies that not only water quality but more important the sanitary risk involved in a certain water source and the response of the treatment system towards this risk is being assessed when planning and designing a water treatment system.

However as the true limits of pre-treatment technology are not yet known, designs would have to be rather conservative and would leave considerable room for optimization. Furthermore operational problems may show up due to the fact that research in pre-treatment technology is very recent and therefore has not lead to a full understanding of the processes involved. Further research and development is thus needed to obtain better insight in the processes to enable their technical and economical optimization, establish adequate operation and maintenance procedures and analyze their effect on possible disinfection. Late 1992 another area for additional research was identified when first bench tests proved that roughing filtration has potential application in combination with conventional treatment processes which are based on dosing of chemicals. Not only does pre-treatment strongly reduce the required chemical dose, but they can also improve the operational conditions, thus having a very good potential even for optimizing existing conventional systems.

## 1 INTRODUCCION

El abastecimiento de agua potable y saneamiento básico, complementados con educación sanitaria, son considerados esenciales para el mejoramiento de la salud pública y el desarrollo socioeconómico, particularmente en países con significativa parte de su población afectada por enfermedades relacionadas con el agua. Este tipo de enfermedades se encuentra entre las tres principales causas de morbilidad y muerte en el mundo (OPS, 1990), afectando principalmente a los grupos humanos que viven en asentamientos con limitaciones en su infraestructura sanitaria. Esta situación limita la posibilidad de una vida digna y reduce significativamente la productividad.

La **cobertura** de abastecimiento de agua con **continuidad**, suficiente **cantidad** y de buena **calidad** son factores importantes en la reducción de enfermedades relacionadas con el agua. La calidad del agua se debe reflejar en un bajo nivel de riesgo de transportar agentes que puedan causar enfermedad, en una apariencia tal que no motive rechazo en el consumidor y en que no deteriore o limite la operación normal de los diferentes componentes del sistema de abastecimiento de agua.

Los programas de inversión social en los países con limitaciones en su infraestructura sanitaria deben dar prioridad a la **selección**, **desarrollo** y **transferencia** de tecnología en agua potable y saneamiento, en armonía con sus condiciones locales. Para que se sostenga en el tiempo, esta tecnología debe corresponder con la **capacidad de gestión** de las comunidades beneficiadas, *para que puedan ser administrados, operados y mantenidos con un mínimo de soporte externo* y a un **costo** accesible a los usuarios, según criterios previamente convenidos.

En la **región de América Latina y el Caribe**, la cobertura urbana de servicios de abastecimiento de agua aumentó de 186 millones (84%) en 1980 a 256 millones (88%) en 1988, y la cobertura de servicios de alcantarillado se incrementó de 100 millones (40%) en 1980 a 142 millones (49%) en 1988. El abastecimiento de agua con conexión domiciliaria o fácil acceso en el sector rural se amplió de 49 millones (40%) a 68 millones (55%) y los servicios de saneamiento rural se mantuvieron en 32% en el mismo período (OPS, 1990).

Sin embargo, las limitaciones en los hábitos comunitarios para el uso eficiente del agua, aunados a problemas de operación y mantenimiento, ocasionan que muchos sistemas en la región funcionen intermitentemente, de esta manera, las inversiones en este tipo de sistemas pueden tener un impacto muy limitado en el mejoramiento de la salud pública. Además, el recurso hídrico no está bien administrado ni protegido y las actividades domésticas y agro-industriales crean conflictos en su aprovechamiento. Esto es particularmente significativo en el caso de las fuentes superficiales, que son el recurso para más del 50% de las comunidades de

América Latina y el Caribe y en algunas zonas, como el valle geográfico del Río Cauca en los andes colombianos, lo son para más del 80% de las cabeceras municipales y más del 60% de los núcleos rurales. En este tipo de fuentes la erosión ocasiona aumentos en la concentración de sólidos y las descargas sin tratamiento de aproximadamente el 90% de las aguas residuales municipales elevan el nivel de contaminación físicoquímica y microbiológica. Esta situación aumenta los riesgos sanitarios asociados con este tipo de fuentes y ante la baja cobertura de sistemas de abastecimiento de agua con plantas de tratamiento eficaces con suficientemente flexibilidad en su operación, el agua que se suministra a las poblaciones se aleja cada vez más de las guías de calidad establecidas.

Dentro del Programa de Desarrollo de Colombia, el gobierno está dando especial importancia al sector de agua potable y saneamiento básico procurando así superar las limitaciones encontradas en un diagnóstico amplio del país en esta materia (DNP - UDU, 1991) del cual se retoman los siguientes aspectos:

- La cobertura con sistema de abastecimiento de agua se estima en 66% y la de remoción y disposición de aguas residuales en un 51%. En el rango de tamaño de población entre 12000 y 30000 habitantes que incluye 84 cabeceras municipales (8% del total) con el 7% de la población colombiana, la cobertura de abastecimiento de agua se estima en 62% y la de remoción en 48%. En los asentamientos con menos de 12000 habitantes, con el 41% de la población Colombiana, que incluye 858 cabeceras municipales (84% del total) y los núcleos rurales, sólo el 24% tiene cobertura domiciliaria de acueducto y el 8% de alcantarillado.
- Al terminar el decenio de los 80, el 52% de los sistemas de abastecimiento incluía algún tipo de tratamiento de los cuales sólo el 28% era completo. En los asentamientos con núcleos de menos de 12000 habitantes, el 30% de los sistemas de abastecimiento incluían algún tipo de estructuras de tratamiento de agua, pero sólo en el 4% de estos eran completos, aunque sin información confiable sobre su continuidad o eficiencia.

Consecuentemente con ese diagnóstico amplio del sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia, se formuló un plan de desarrollo, el cual incluye acciones orientadas a mejorar la **capacidad de gestión** del nivel local, regional y nacional, la **cobertura, la cantidad, la continuidad, la calidad y los costos** en la prestación del servicio de abastecimiento de agua. La componente de calidad se destaca en uno de los cuatro objetivos principales del plan que establece que todos los sistemas de abastecimiento deben producir agua potable, lo mismo que en una de sus ocho líneas de acción : El Programa de Mejoramiento de la Calidad de Agua.

El estudio aquí presentado sienta bases sólidas sobre las cuales se puede completar el desarrollo y la transferencia de alternativas técnicas, económicas y socialmente competitivas para la potabilización de agua de la gran mayoría de asentamientos humanos, que dependen de fuentes superficiales de agua con diferentes grados de contaminación. Este estudio está orientado a la investigación comparativa de diferentes alternativas de pretratamiento que pueden ser aplicadas en combinación con la tecnología de filtración lenta en arena, de tal manera que puedan superarse las limitaciones que impiden la aplicación más amplia de esta tecnología.

## 2 LA FILTRACION LENTA EN ARENA COMO ALTERNATIVA DE POTABILIZACION DE AGUA

Durante la década de los 70's y parte de los 80's la Ingeniería Latinoamericana hizo importantes aportes a la optimización de los procesos asociados a la filtración rápida de agua químicamente coagulada y a reducir sus requerimientos de equipo e instrumentación. Esto volvió menos exigente la operación y el mantenimiento de esta tecnología y menos altos sus costos de inversión y sostenimiento.

Sin embargo, la necesidad de gestionar, comprar, transportar, almacenar y dosificar adecuadamente compuestos químicos, ha limitado el aprovechamiento eficaz de la filtración rápida en la gran mayoría de cabeceras municipales y en los núcleos rurales, donde el desarrollo institucional, la infraestructura de medios de comunicación y las condiciones socioeconómicas, impiden mantener el soporte mínimo que requiere el nivel local que los utilice para producir agua de buena calidad.

En contraste, la filtración lenta en arena (FLA) es reconocida como una excelente alternativa de potabilización de agua, económicamente competitiva y con bajos requerimientos técnicos para su operación y mantenimiento (Huisman et al., 1974; WHO, 1987). Esta tecnología tiene ya una larga historia en el mejoramiento de calidad de agua para consumo humano. Los primeros registros sobre su utilización datan de comienzos del siglo pasado y gradualmente se fue teniendo evidencia sobre la reducción de los casos de cólera y fiebre tifoidea cuando el agua se filtraba. Consecuentemente, al finalizar el siglo XIX, en las principales ciudades europeas se recomendaba o se exigía el uso de la filtración del agua para consumo humano.

El primer registro histórico sobre el uso de la tecnología es de 1804, en Paisley, Escocia. En Londres, la tecnología de FLA se empezó a utilizar en 1829; en Berlín, en 1856; en Altona, 1860 y en Zurich, en 1871. En 1892 se presentó en Alemania un hecho que subrayó la importancia de la filtración. En Hamburgo se presentaron más de 7500 muertes en una epidemia de cólera, mientras que en la ciudad vecina de Altona sólo se presentaron unas pocas defunciones (Huisman et al, 1974). Ambas ciudades captaban agua del río Elba, pero sólo Altona la filtraba antes de distribuirla. La planta de filtración de Hamburgo fue construída trabajando día y noche y puesta en operación en 1893 (Hazen, 1913; citado por Bellamy et al, 1985). Al finalizar el siglo pasado, cerca de 55 m<sup>3</sup>/s de agua estaban siendo filtrados en Europa, antes de su distribución (Hazen, 1913).

En Europa, la tecnología FLA continúa siendo uno de los principales componentes de los sistemas de tratamiento de agua, inclusive, en grandes ciudades como Amsterdam, Londres y Zurich. En USA la aplicación de la tecnología no ha sido tan amplia. Las carreras cortas de filtración asociadas con las aguas turbias, encontradas en las regiones oriental y centro-occidental del país, estimularon el interés en la tecnología de filtración rápida de agua químicamente coagulada, en desarrollo desde finales del siglo pasado (Bellamy et al, 1985). Consecuentemente, el aprovechamiento de la tecnología de FLA, se ha hecho con fuentes de agua de muy buena calidad y sirviendo principalmente comunidades pequeñas.

Un total de 71 plantas de tratamiento con la tecnología de FLA fueron identificados en USA (Sims et al., 1991). Con base en encuestas realizadas inicialmente a 27 de estas plantas (Slezak et al., 1984) y después ampliada hasta 47 (Sims et al, 1991) se tiene una buena visión sobre su aprovechamiento. El 76% de la población servida corresponde a comunidades pequeñas, menores de 10000 habitantes, el 21% entre 10000 y 100000 y el 3% a mayores de 100000. La mayoría (54%) utilizan pequeños ríos, el 41% lagos o embalses y el 5% agua subterránea. Estas fuentes tenían una turbiedad promedio de 2 UNT con valores pico de 15 UNT. 88% de las plantas producían turbiedades inferiores a 1 UNT y cuando la turbiedad de entrada fue de 10 UNT, entonces el 95% de las veces el efluente cumplió con el criterio de 1.0 UNT. Cerca del 80% de las fuentes de agua tenían menos de 100 coliformes por 100 ml y más del 70% de las plantas producían efluentes con niveles menores o iguales a 1 coliforme por 100 ml.

En América Latina, la filtración lenta en arena fue introducida sin un procedimiento adecuado de transferencia y adaptación a las condiciones propias de la región. En general, su aprovechamiento ha sido muy limitado y en países como Brasil (Hespanhol, 1969) y Perú (Canepa, 1982), donde se construyeron un mayor número de plantas, los resultados fueron muy deficientes.

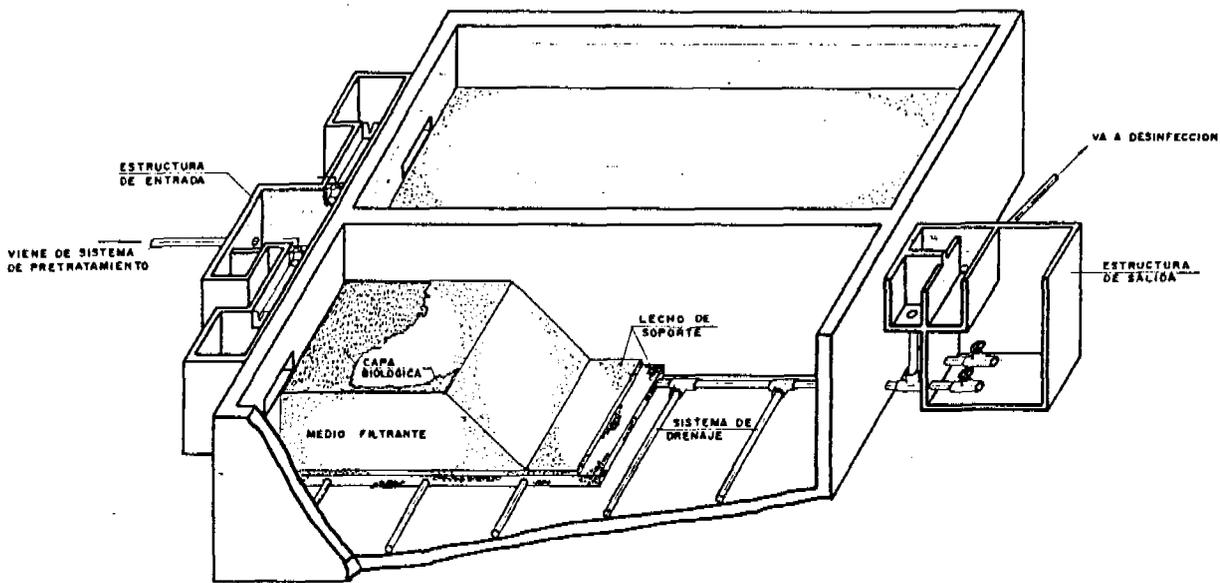
Ahora, existe un renovado interés en la aplicación de la tecnología de FLA. Diferentes factores podrían citarse para explicar este hecho, dentro de los cuales cabe mencionar actividades realizadas en el marco del Decenio del Agua, promovido por la Organización de Naciones Unidas (ONU); el "Development and Demonstration Programme on Slow Sand Filtration", apoyado financieramente por el gobierno de los Países Bajos y realizado por el IRC, International Water and Sanitation Centre, en colaboración con instituciones del sector de agua de diferentes países, incluido Colombia (Galvis et al, 1989); el reciente reconocimiento de la tecnología en USA como una excelente alternativa para el tratamiento de agua, donde se tiene previsto la construcción de cientos de plantas en el marco de sus programas de mejoramiento de la salud pública (Longsdon et al, 1988) y la decisión de realizar importantes inversiones para el mejoramiento de la calidad del agua tanto en los sistemas de abastecimiento de agua existentes, como en los que se construyan para aumentar la cobertura en países como Colombia, donde se necesitan tecnologías con bajos requerimientos técnicos y económicos para aumentar su eficacia, aceptación comunitaria y permanencia (DNP, 1991; ACODAL, 1992).

Es claro que la tecnología tiene un gran espacio ganado en el campo de la potabilización de agua y sus más grandes usuarios, como el Thames Water Authority en Inglaterra, consideran que su potencial ameritará nuevos desarrollos, aún en el próximo siglo (Rachwal et al, 1988). Sin embargo, este potencial seguirá sin ser aprovechado en países andinos y tropicales como Colombia, donde la capacidad de transporte de sólidos o los niveles de contaminación de las fuentes de agua impidan su adecuado aprovechamiento. Esto sustenta la importancia del desarrollo de alternativas de pretratamiento para acondicionar el agua que procesan las unidades de FLA. Estas alternativas de pretratamiento no deben presentar los niveles de complejidad técnica y los costos de sostenimiento de aquellas que actualmente se utilizan en Europa.

## 2.1 LAS UNIDADES DE FILTRACION LENTA EN ARENA

En la Figura 2.1, se presenta el esquema de una unidad de FLA. El nivel del agua sobrenadante proporciona la energía hidráulica para que haya flujo a través del lecho de arena. El mejoramiento de la calidad del agua en los lechos es consecuencia de una combinación de procesos de naturaleza física, química y biológica (Huisman et al, 1974) cuyos mecanismos no se han acabado de comprender (Haarhoff et al, 1991). Sin embargo, es claro que el mantenimiento de estos procesos, en particular de la actividad biológica, requiere de un diseño cuidadoso y de una adecuada operación y mantenimiento. En la Tabla 2.1 se resumen criterios de diseño presentados por diferentes autores con base en diferentes experiencias y circunstancias. Aquellos recomendados por Visscher et al (1987), se han venido considerando particularmente adecuados para sistemas pequeños, aún en países como USA (Pyper et al., 1991). El desarrollo de unas adecuadas técnicas de pretratamiento, seguramente permitirá criterios de diseño más exigentes con un claro impacto en la ampliación de la competitividad técnica y económica de esta tecnología.

El caudal de agua a filtrar puede ser controlado a la salida o a la entrada. La Primera alternativa requiere el ajuste periódico de una válvula reguladora de pérdida de energía en el efluente, lo cual permite mantener el caudal aproximadamente constante a medida que el lecho se colmata. En la segunda opción (Figura 2.1), el aumento gradual de pérdida de energía hidráulica en el lecho, se compensa con un aumento del nivel del agua sobrenadante. Esto hace más sencillo el trabajo del operador que no necesita operar una válvula reguladora para mantener el caudal tratado. En ambas alternativas se debe planear la limpieza periódica de la unidad. Esto se realiza raspando los 1 o 2 cms superiores de la camada de arena, donde se acumula la mayor parte del material inorgánico, orgánico y la biomasa, dando origen a una especie de biomembrana, más comúnmente conocida como "Schmutzdecke" (capa sucia). En esta biomembrana sucede la mayor parte de la pérdida de energía hidráulica, de tal manera que su raspado permite recuperar la conductividad hidráulica del filtro.



**FIGURA 2.1. Componentes básicos de una unidad de Filtración Lenta con control a la entrada.**

Estos raspados periódicos continúan hasta una profundidad mínima del lecho de arena del orden de los 50 cms. Para el rearenamiento se recomienda hacer zanjas que permitan acumular la arena remanente en los lechos encima de la arena lavada que se ésta reponiendo (Huisman et al.,1974). De esta manera se evita la acumulación de sólidos en el lecho filtrante y se promueve una reducción de los períodos de maduración, al mantener una biomasa adaptada a las características de la fuente superficial que alimente el sistema.

La duración de las carreras de filtración y la frecuencia de los rearenamientos tienen un impacto importante en los costos de sostenimiento, en la aceptación de la tecnología y eventualmente en la eficiencia de los procesos de tratamiento. El raspado manual utilizando palas, de 1 o 2 cms de la capa superior de arena requiere del orden de 5 horas-hombre por cada 100 m<sup>2</sup> de lecho (Letterman et al, 1985). El análisis de la información de 25 plantas de FLA en USA, indicó que las carreras de filtración más largas se presentaban en invierno, del orden de 60 días, y las más cortas en primavera, del orden de 40 días (Sims et al., 1991). En un estudio de 5 plantas tratando aguas de lago, con turbiedad en el orden de 1 a 3 UNT, presentaron carreras entre 3 y 6 meses y una planta tratando turbiedades en el orden de 7 a 9 UNT, con picos de turbiedad de 20 a 40 UNT, presentó un promedio de longitud de carrera de un mes, con algunos períodos de tan sólo dos días (Letterman et al, 1985).

**TABLA 2.1 Criterios de diseño recomendados para Unidades de Filtración Lenta en Arena (Pyper et al, 1991).**

Criterios de Diseño	RECOMENDACION		
	Ten States Standars USA (1987)	Huisman and Wood (1974)	Vissher et al (1987)
Período de operación	No establece	24 h/d	24 h/d
Velocidad de filtración	0.08 - 0.24	0.1 - 0.4	0.1 - 0.2
Altura de arena (m)			
inicial	0.8	1.2	0.9
mínima		0.7	0.5
Diámetro efectivo (mm)	0.30 - 0.45	0.15 - 0.35	0.15 - 0.30
Coefficiente de uniformidad			
Aceptable	≤ 2.5	< 3	< 5
Deseable		< 2	< 3
Altura del lecho de soporte, incluyendo el drenaje (m)	0.4 - 0.6	No establece	0.3 - 0.5
Altura de agua sobrenadante (m)	≥ 0.9	1 - 1.5	1
Borde libre (m)	No establece	0.2 - 0.3	No establece

## **2.2 LIMITACIONES DE LA TECNOLOGIA ORIGINADAS EN LAS CARACTERISTICAS DE LAS FUENTES DE AGUA**

Cuando la tecnología de FLA es adecuadamente seleccionada, diseñada, construida, operada y mantenida, produce efluentes con baja turbiedad, sin la presencia de impurezas ofensivas, y lo que es más importante, virtualmente libre de entero - bacterias, entero - virus y de quistes de protozoarios. En relación con las características de las fuentes de agua a tratar, se debe tener en cuenta una serie de limitaciones que puede presentar la tecnología. Estas limitaciones se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- i) Que su eficiencia resulte insuficiente para producir un efluente de buena calidad frente a los niveles de contaminación que presenta el afluente.
- ii) Que se reduzca o inhiba la eficiencia de sus procesos de tratamiento.
- iii) Que sus ciclos o carreras de filtración se hagan demasiado cortas.

### 2.2.1 Niveles de contaminación que superan la eficiencia

En la Tabla 2.2 se resumen las eficiencias que puede presentar la tecnología para varios parámetros de interés sanitario. Estas eficiencias han sido reportadas en unidades operadas con velocidades en el rango de 0.04 a 0.20 m/h, temperaturas superiores a 5°C y lechos de arena en tamaño efectivo entre 0.15 y 0.30 mm y profundidades superiores a 0.5 m.

**TABLA 2.2 Eficiencias típicas de tratamiento para Filtros Lentos de Arena (Ref: Bellamy et al., 1985; Ellis, 1985; Huck, 1987; Hrubec et al., 1991; Hoarhoff, 1991).**

PARAMETRO	REDUCCION TIPICA
Entero-bacterias	90-99.9%; sin embargo, la eficiencia de remoción de coliformes es reducida por bajas temperaturas, aumento en la velocidad de filtración, uso de arena gruesa, poca profundidad del lecho de arena, concentración reducida del contaminante y justo después de la remoción de la membrana biológica.
Quistes de protozoarios	99-99.99% o aún mayor, inclusive después de la remoción de la biomembrana.
Cercarias de esquistosoma	Remoción virtualmente completa.
Turbiedad	Generalmente reducida a menos de 1 UNT si el afluente presenta valores inferiores a 10 UNT. La eficiencia de remoción puede afectarse por la naturaleza y la distribución de las partículas.
Color real	30-90%, siendo 30% la eficiencia más usualmente reportada.
Materia orgánica	DQO 30-70%; COT 15-30%. Materia orgánica tal como ácidos húmicos, detergentes, fenoles, y algunos pesticidas y herbicidas pueden ser removidos en el rango de 5-90%.
Hierro, Manganeseo	Pueden ser significativamente removidos.
Metales pesados	30-90% o aún más.

## **Elevada contaminación microbiológica**

Es claro que la tecnología puede presentar altas capacidades de remoción, particularmente para parámetros de naturaleza microbiológica. Sin embargo es importante tener en cuenta que existen fuentes de abastecimiento de agua, prácticamente obligadas para una comunidad, donde aún para este tipo de parámetros, los niveles de contaminación son tan altos que las unidades de FLA sólo resultarían insuficientes para producir un efluente de bajo riesgo sanitario.

## **Materia orgánica**

También hay evidencia en la literatura sobre las limitaciones de la tecnología para reducir eficientemente el nivel de algunos indicadores de calidad de agua que reflejan la presencia de materia orgánica en general o de componentes húmicos en particular. En efecto, la remoción de color real asociado a sustancias húmicas es reportado normalmente en el orden de 25 al 30% (Cleasby et al, 1984; Ellis, 1985; Collins et al, 1991). Tradicionalmente, esto no fue motivo de mayor interés. El color fué considerado, en el peor de los casos, como un problema estético. Ahora, después del descubrimiento de que el cloro reacciona con materia orgánica de origen natural para formar subproductos potencialmente dañinos (Rook, 1974) y el reconocimiento de que el color es un indicador de la presencia de sustancias húmicas, fuente principal de materia orgánica en las fuentes superficiales, esta motivando recomendaciones para limitar el nivel de color en el afluente de las unidades de FLA al rango de 15 a 25 UPC (Collins et al 1989).

Las limitaciones antes presentadas en la remoción de color real, son consistentes con las reducciones normalmente reportadas para Carbón Orgánico Total (COT), Demanda Química de oxígeno (DQO) o Carbono Orgánico Disuelto (COD), con valores en el rango del 10 al 25% (Fox et al., 1984; Williams, 1985). Algunos estudios reportan valores significativamente más altos, en el rango de 50 al 68% (Joshi et al., 1982). Estos valores no fueron afectados por los cambios en velocidad de filtración en el rango de 0.1 a 0.3 m/h. Esta discrepancia en las eficiencias de remoción puede originarse en la naturaleza diversa de los compuestos orgánicos agrupados en mediciones indirectas, representadas en parámetros tales como COT y DQO. Esto lo evidencia un estudio en Alemania (Haberer et al., 1984) que mostró la gran diferencia en la remoción de seis clases de compuestos orgánicos. Las eficiencias promedio más bajas, del orden del 4%, se presentaron en hidrocarburos halogenados volátiles; las más altas, del orden del 86%, se presentaron con compuestos aromáticos policíclicos.

## **Materia coloidal**

El tratamiento de fuentes de agua que contengan arcillas con partículas muy pequeñas, de naturaleza coloidal, puede presentar baja eficiencia en la remoción de turbiedad. Bellamy et al., (1985), reporta remociones de turbiedad en el rango de 27 a 39% para un río de montaña con muy bajo contenido de materia orgánica. En el mismo estudio se observó que estas eficiencias podían ser mejoradas si se agregaban nutrientes orgánicos a la fuente de agua.

Adicionalmente, la tecnología de FLA puede presentar limitaciones para remover otros contaminantes disueltos, como los metales pesados, aunque podrían observarse remociones altas si estos contaminantes se presentan asociados con material particulado (Cleasby, 1991).

### **2.2.2 Reducción o Inhibición de la Eficiencia**

Diversas circunstancias pueden interferir con los procesos de tratamiento en las unidades de FLA, de manera que no se pueden alcanzar las eficiencias normales de remoción de contaminantes. Entre las principales condiciones inhibitorias pueden citarse: bajas temperaturas, escasez de nutrientes y bajos niveles de oxígeno disuelto.

#### **Bajas temperaturas**

Las bajas temperaturas incrementan la viscosidad del agua a filtrar y reducen el crecimiento y la actividad biológica en la biomembrana. Huisman (1974), reporta que la remoción de E.Coli se reduce de un 99% a 20°C a un 50% a 2°C. Esta información es consistente con la presentada por Toms et al., (1988), según la cual, filtros operados a 0.3 m/h y temperaturas menores a 4°C produjeron efluentes con niveles de Unidades Formadoras de Colonias fecales(UFC) superiores a 50 por 100 ml. La estrategia en países estacionales como los Países Bajos, Suiza o USA, para hacer frente a las temperaturas ha sido cubrir o enterrar los filtros. Aplicar una menor velocidad de filtración también puede ser una forma de enfrentar esta limitación, como puede desprenderse de la información presentada por Toms et al., la cual indica que las plantas de Londres antes de su optimización, operando a velocidades de filtración menores de 0.2 m/h, producían regularmente un efluente con menos de 10 UFC/100 ml a temperaturas menores de 4°C.

### **Escasez de nutrientes**

Los microorganismos en la biomembrana y en el lecho de arena necesitan carbono, nitrógeno y azufre para su metabolismo y crecimiento. Los ácidos húmicos y fúlvicos son ricos en carbono pero sólo contienen trazas de nitrógeno, fósforo o azufre (Spencer et al., 1991). Esto explicaría las limitaciones de las unidades de FLA para remover color de fuentes de agua bien protegidas con muy bajos niveles de nutrientes y los resultados reportados por Bellamy et al., (1985), según los cuales la adición de nutrientes permitió incrementar la actividad biológica en los lechos de arena y su eficiencia de remoción de turbiedad coloidal y de microorganismos indicadores de calidad microbiológica.

### **Bajos niveles de oxígeno disuelto**

Cuando las velocidades de filtración son bajas, el oxígeno disuelto en el agua puede agotarse debido al largo tiempo de contacto con los microorganismos que lo consumen (Joshiet et al., 1982). Las condiciones anaeróbicas en los lechos deben evitarse, pues pueden ocasionar serios problemas de calidad de agua, tales como olores y sabores o la resuspensión de metales que pueden ocasionar problemas estéticos y aumentar la demanda de cloro del agua filtrada (Ellis, 1985).

### **2.2.3 Reducción de las carreras o períodos de filtración**

Teniendo en cuenta criterios tales como costos de mantenimiento y la aceptación de la tecnología por parte de operadores con recursos mecánicos limitados, se ha sugerido que el periodo mínimo de filtración debe ser del orden de 30 días (Hendricks et al., 1991; Collins et al., 1991).

## Niveles de turbiedad

Para reducir los riesgos de producir efluente con valores altos de turbiedad o la colmatación prematura de los lechos filtrantes, Huisman et al., (1974), recomienda que la fuente de agua tenga turbiedades inferiores a 10 mg/l como  $S_iO_2$  y considera que turbiedades mayores, en el rango de los 50 a 200 mg/l  $S_iO_2$ , con duraciones de unos "pocos" días, pueden ser también tratadas. En una amplia revisión de literatura realizada por Ellis (1985), la mayoría de las referencias establecen un límite superior de la turbiedad en el rango de 10 - 50 UNT y consideran aceptables valores en el rango de 50 - 120 UNT si sus duraciones son inferiores a los 2 días. En la medida en que las normas de calidad de agua para consumo humano se hacen más exigentes, autores como Cleasby et al. (1984), recomiendan que la turbiedad en la fuente debe ser inferior a las 5 UNT.

Aunque la turbiedad es el parámetro más frecuentemente utilizado para indicar de manera indirecta el contenido de material particulado en el agua, se ha venido reconociendo su limitación para reflejar la carga de sólidos que reciben los lechos filtrantes, especialmente cuando las partículas no son de naturaleza arcillosa o silicea. Este sería el caso de las algas o de flóculos de hierro, por ejemplo, cuando variables como densidad y propiedades ópticas, hacen más compleja la relación entre turbiedad (UNT) y sólidos suspendidos (mg/l). Especial atención merece también la distribución de tamaños que transporta la fuente de agua, pues esto afecta la eficiencia de los mecanismos de remoción de partículas en el proceso de filtración.

## Presencia de algas

Las algas pueden estar presentes en las fuentes de agua o crecer en el sobrenadante de los filtros lentos en arena, si existen condiciones favorables de nutrientes y radiación solar. En este último caso la cobertura de los filtros lentos para evitar la radiación solar permitiría controlar el efecto de las algas en los ciclos de filtración.

Las algas presentes en cantidades moderadas son usualmente benéficas para el funcionamiento de los filtros. Las algas son generalmente retenidas a la altura de la biomembrana, con traspasos individuales de algas unicelulares (Toms et al., 1988). Además de la acumulación prematura de pérdida de energía hidráulica que pueden reducir hasta un sexto los periodos de filtración (Ives, 1957) los crecimientos significativos de algas pueden originar sabores y olores, aumentar la concentración de productos orgánicos solubles y las dificultades asociadas con la precipitación de Carbonato de calcio.

Como consecuencia de la actividad fotosintética, las algas pueden afectar la capacidad reguladora del agua y aumentar el pH a niveles que pueden ocasionar precipitaciones de hidróxidos de magnesio y calcio sobre los granos de arena (Ives, 1957). Esto contribuye a la obstrucción de los lechos y a aumentar el tamaño efectivo de la arena, lo cual puede repercutir

además en la eficiencia del tratamiento. Con base en su trabajo experimental Cleasby et al., (1984), consideran que la enumeración de las algas puede llegar a ser buen indicador de la duración de los ciclos de filtración y recomienda un límite superior de  $5\text{mg/m}^3$  de clorofila-a como un parámetro indirecto para controlar el nivel de algas en el sobrenadante.

### **Hierro y manganeso**

En los lechos de filtración pueden haber bacterias capaces de ayudar en la oxidación de hierro y manganeso presentes en el agua. Pequeñas cantidades de precipitados de hierro mejoran la capacidad de remoción de compuestos orgánicos (Collins et al., 1985). Sin embargo, concentraciones de hierro superiores a  $1\text{ mg/l}$ , pueden contribuir significativamente a la colmatación de los lechos de arena (Spencer et al., 1991).  $1\text{ mg/l}$  de hierro es aproximadamente equivalente a una dosis de  $4.8\text{ mg/l}$  de cloruro férrico (Cleasby, 1990)

En resumen, en la Tabla 2.3 se presentan algunos criterios que según la literatura revisada, hacen que una fuente sea ideal para su tratamiento directo con unidades de FLA.

**TABLA 2.3** Algunos límites de calidad de Agua para evaluar posible tratamiento directo con unidades de Filtración Lenta en Arena.

Criterio	Spencer et al., (1991)	Cleasby, (1991)	Di Bernardo (1991)
Turbiedad	5 - 10 UNT <sup>(1)</sup>	5 UNT	10 UNT
Algas (Unidades/l)	200000 <sup>(2)</sup>	5 mg/m <sup>3</sup> <sup>(3)</sup>	250000
Color Real	15 - 25 UPC		5 UPC
Absorbancia UV, 254 nm	0.08 UA		
Oxígeno Disuelto	> 6 mg/l		
Fósforo (PO <sub>4</sub> )	30 µg/l		
Amoníaco	3 mg/l		
Hierro Total	1 mg/l	0.3 mg/l	2.0 mg/l
Manganeso		0.05 mg/l	0.2 mg/l
Coliformes Fecales (NMP)			200 org/100ml

- (1) De ser posible, se recomienda tener en cuenta la naturaleza de la turbiedad y la distribución de tamaño de las partículas.
- (2) Depende no solamente del número sino también de las especies presentes en la fuente de agua. Esta recomendación supone filtros cubiertos.
- (3) Este límite corresponde a clorofila -a, como una medida indirecta del nivel de algas.

### **3 ENFRENTANDO LAS LIMITACIONES CON EL CONCEPTO DE MULTIBARRERA**

Las características de calidad de agua de la mayoría de las fuentes superficiales, presentan un amplio rango de limitaciones para su tratamiento directo con FLA. Además, estas limitaciones se agudizan en la época de lluvias, pues las fuentes tienden a presentar grandes cambios de calidad en períodos cortos de tiempo. Esta situación y el hecho de que una única etapa de tratamiento implica un mayor riesgo sanitario en caso de alguna falla o deficiencia, hacen esencial la aplicación del concepto multibarrera.

El concepto multibarrera tiene una larga historia y ha evolucionado gradualmente de la práctica en mejoramiento de la calidad de agua (Craun, 1988). Según este concepto, se debe tener más de una etapa de tratamiento para producir agua apta para consumo humano. Juntas, estas etapas remueven progresivamente los contaminantes del agua cruda y consistentemente producen agua potable. Idealmente, se debe obtener agua de bajo riesgo sanitario antes de la etapa final de tratamiento, la cual se convierte entonces en una barrera de seguridad (LLoyd, 1974; Galvis et al, 1992). La desinfección es normalmente esta última línea de defensa y para que ella sea efectiva, se requiere que las barreras o etapas previas eliminen virtualmente los microorganismos patógenos y las sustancias que puedan interferirla. Esto es particularmente importante en situaciones donde hay evidencia de que el proceso de desinfección es todavía muy vulnerable. De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud (OPS), más del 75% de los sistemas de desinfección en latinoamérica no están operando adecuadamente (Reiff, 1988).

#### **3.1 APLICANDO EL CONCEPTO DE MULTIBARRERA**

La identificación de nuevos riesgos asociados con la calidad de agua y la presión de legislación cada vez más exigente, explica la aplicación y el desarrollo gradual del concepto de multibarrera en importantes ciudades tales como Londres y Zurich (Galvis et al, 1991). En la planeación y realización de nuevos proyectos se pueden invertir los papeles y hacer consideraciones más integrales sobre las barreras que debe incluir un sistema de potabilización de agua. Esto parece haberse subestimado, particularmente en el sector rural y los pequeños y medianos municipios, donde sus limitaciones de infraestructura hacen más crítica esa aproximación integral en el proceso de selección o desarrollo y transferencia de tecnología. Tres aspectos básicos deberían ser tenidos en cuenta durante este proceso (Galvis et al., 1991):

- a) El riesgo sanitario asociado con la calidad de agua en la cuenca.
- b) La eficiencia de la combinación de las diferentes barreras o etapas de tratamiento.
- c) La aceptación socio-cultural y la posibilidad de sostenimiento a largo plazo.

Seleccionar y proteger las fuentes de agua es normalmente más económico y efectivo que permitir desarrollos inadecuados en las cuencas y posteriormente tener que depender de sistemas de tratamientos más o menos complejos y costosos (Okun, 1991). Sin embargo, en algunas regiones, la naturaleza geológica de las cuencas o en otras, políticas equivocadas de desarrollo, junto a legislación insuficiente y a limitaciones de capacitación del recurso humano para posibilitar su cumplimiento, hacen que los niveles de contaminación en las fuentes disponibles de agua impidan la aplicación de la tecnología de FLA como única etapa de tratamiento para producir un efluente de bajo riesgo sanitario, antes del proceso de desinfección como barrera de seguridad.

En EEUU el aprovechamiento de la tecnología de FLA se ha restringido al tratamiento de agua con muy bajos niveles de contaminación (Cleasby, 1984; Sims et al, 1991). Ahora, organizaciones como la American Water Work Association (AWWA), American Society of Civil Engineering (ASCE) promueven el estudio y la utilización de otras etapas de tratamiento que amplíen el potencial de la tecnología de FLA (Collins et al, 1991; Cleasby, 1991). En Europa, las unidades de FLA se usan en combinación con otras tecnologías tales como la filtración rápida, la ozonización, el carbón activado, cuyos requerimientos técnicos y los costos operación y mantenimiento guardan relación con la capacidad de gestión y la infraestructura disponible en las comunidades beneficiadas. En la gran mayoría de los asentamientos humanos de regiones como la América Latina y el Caribe, se requiere considerar otras alternativas de pretratamiento, si se quieren cumplir los criterios antes enunciados, particularmente aquel relacionado con la aceptación socio-cultural y la posibilidad de sostenimiento a largo plazo.

## 4 ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO

En cumplimiento de programas de mejoramiento de calidad de agua para núcleos rurales y pequeñas municipalidades, las etapas previas de tratamiento o pretratamientos que se utilicen en combinación con la tecnología FLA, no deben comprometer su simplicidad en la operación y el mantenimiento. En el marco del proyecto que motiva el presente informe se produjo una revisión preliminar de alternativas de pretratamiento que no requieren la dosificación de compuestos químicos (Smet et al., 1989). Ellas incluyen las siguientes opciones: captaciones con base en pozos o galerías de infiltración; Sedimentación simple; filtración gruesa dinámicas; filtración gruesa con flujo descendente, ascendente u horizontal. A continuación se hacen consideraciones sobre estas opciones:

### 4.1 POZOS DE INFILTRACION

Una de las técnicas más antiguas de pretratamiento la constituyen la filtración de agua a orillas de los ríos o pozos de infiltración. Dependiendo de la calidad del agua en el río y de las características del suelo a través del cual se debe percolar el agua que se capta, esta puede resultar adecuada para desinfección o como afluente para unidades de FLA. Engels et al., (1989) reportan problemas en la resuspensión de óxidos de hierro y manganeso presentes en el suelo, cuando los niveles de oxígeno en el río han caído por debajo de 1 mg/l. Cambios en la capacidad de transporte de sólidos de la fuente pueden afectar la capacidad de captación de los pozos, ante la dificultad de mantenimiento del material filtrante.

### 4.2 GALERIAS DE INFILTRACION

Las galerías de infiltración consisten principalmente de tuberías perforadas colocadas en los lechos de los ríos. Si la permeabilidad del lecho natural es muy baja, este puede ser reemplazado parcialmente por otro material, tal como grava y arena. En la Figura 4.1 se ilustran dos modalidades de colocación del material filtrante. Se han reportado velocidades de captación en el rango de 0.25 a 1.5 m/h, dependiendo de la turbiedad en la fuente y de los requerimientos de calidad en el efluente. Trabajando con unidades como las ilustradas en la Figura 4.1 (b), se han reportado eficiencias en la remoción del orden del 98% con turbiedades en los ríos en el rango de 48 a 200 UNT (Salazar, 1980).

La colmatación periódica de los lechos hacen necesario su limpieza o la reposición de material filtrante después de crecientes en los ríos. En la práctica, este mantenimiento se dificulta por la localización del sistema de captación. En evaluaciones hechas en Colombia, varias de este tipo de captaciones a escala real, presentaron eficiencias muy bajas, inferiores al 20%. (CINARA, IRCWD, 1988). El reconocimiento de este tipo de limitaciones, motivó en CINARA el desarrollo de una variante de esta modalidad de pretratamiento que se conoce como filtros gruesos dinámicos, sobre la cual se presenta información en el aparte 4.4.1.

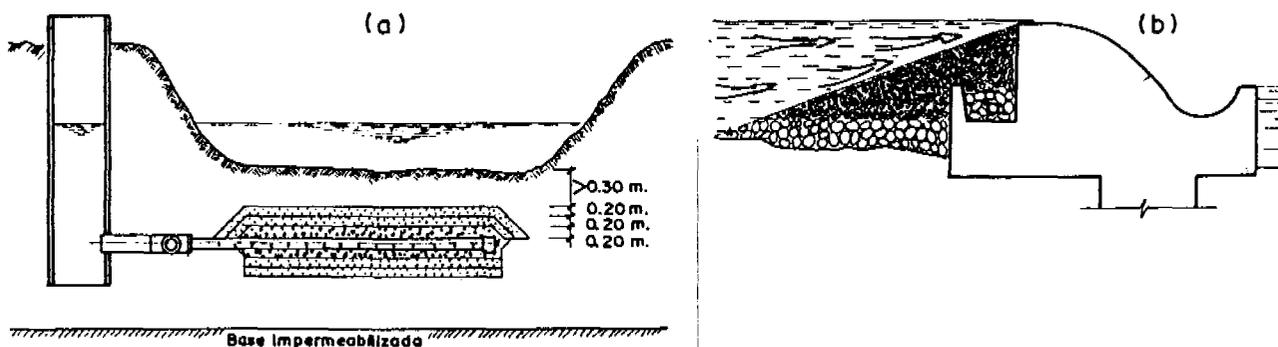


FIGURA 4.1 Galerías de infiltración. (a) sin modificar el gradiente de flujo (Smet et al, 1989) y modificado (b). (Salazar, 1980).

### 4.3 SEDIMENTACION SIMPLE

Se pueden distinguir dos variantes principales en la aplicación de la sedimentación simple en combinación con la tecnología de FLA. De una parte, aquellas con periodos teóricos cortos de retención (menos de un día) y de otra parte, aquellas con periodos largos (del orden de días o semanas). Fuentes de agua con valores altos de sólidos suspendidos pueden mostrar significativas reducciones con cortos periodos de detención, pero el agua sedimentada será aún inapropiada para su tratamiento directo en las unidades de FLA.

Algunos ríos en el medio y sur-occidente de los EEUU transportan hasta 10000 mg/l de sólidos suspendidos y sedimentación simple, con periodos de retención de 3 a 8 horas, puede reducir la turbiedad de estas fuentes a valores inferiores a los 1000 mg/l (Steel, 1953; citado por Cleasby, 1991).

La sedimentación simple tiene poco impacto en fuentes con turbiedad de naturaleza coloidal. En Cincinnati, la sedimentación simple de agua del río Ohio redujo la turbiedad de 170 a 100 mg/l, después de 6 días de retención (Turneure et al., 1940; citado por Cleasby, 1991).

mg/l, después de 6 días de retención (Turneure et al., 1940; citado por Cleasby, 1991). Ensayos de tratabilidad con columnas de sedimentación son recomendables para evaluar este tipo de situaciones. Sin embargo, estos ensayos no se recomiendan para periodos superiores a un día, cuando otros factores tales como efectos térmicos, eólicos o de producción de algas, son de mayor importancia en las Unidades a escala real (Cleasby, 1991).

La sedimentación simple con largos periodos de retención es de uso común en Inglaterra. En Londres durante los meses de enero y febrero se han reportado reducciones de turbiedad del orden de 30 UNT a valores inferiores de 4 UNT (WRC, 1977) y en el periodo 1961-1970, el valor promedio de coliformes fecales de 6680 por 100 ml en el afluente, fue reducido a 249 por 100 ml (Windle Taylor, 1974). Sin embargo, el gran crecimiento periódicos de algas ha obligado la colocación de microcribas o de filtros rápidos antes de los filtros lentos (Ridley, 1967).

Para controlar el crecimiento de algas en los embalses, los ingleses han desarrollado técnicas orientadas a prevenir la estratificación térmica, las cuales incluyen diferentes sistemas de bombeo. El potencial de los embalses como alternativa de pretratamiento en países tropicales y en zonas con limitaciones para sostener estos niveles de mecanización, debe ser cuidadosamente evaluado antes de promover su aprovechamiento amplio.

La sedimentación optimizada por medio de tubos o placa paralelas permite reducir en un 60-70% el área necesaria para la sedimentación simple. La sedimentación en placas paralelas ha sido aplicada exitosamente en el tratamiento de agua químicamente coagulada y prácticamente no hay experiencia en su aplicación en la remoción de partículas no coaguladas. En principio, se considera que ella debe presentar las mismas posibilidades y limitaciones enunciadas antes para la sedimentación simple con periodos cortos de retención. Además, la limpieza más frecuente de los lodos del sedimentador debe ser considerada con especial atención (Castilla et al., 1989).

#### **4.4 FILTROS GRUESOS**

La eficacia del proceso de filtración gruesa se fundamenta en la gran área superficial disponible en los lechos de material granular, que posibilita la existencia de mecanismos de remoción de naturaleza física, química o biológica, según las características del agua a tratar y las especificaciones de la unidad de filtración. A continuación se revisarán los diferentes tipos de filtros, clasificados de acuerdo con las características o sentido de flujo en la unidad.

#### 4.4.1 Filtros Gruesos Dinámicos (FGDi)

Los FGDi consisten en una capa de grava fina (3-6 mm) del orden de 0.2-0.3 m de profundidad, colocada sobre una camada de grava gruesa (12-25 mm), del orden de 0.2 a 0.4 m de profundidad, con tubería perforada como sistema de drenaje en el fondo. En la Figura 4.2 se presenta un esquema de este tipo de unidades.

El agua que entra en la unidad fluye sobre la capa fina de grava y parte de ella drena a través del lecho, hacia la tubería perforada y continúa hacia la siguiente etapa en el sistema de tratamiento, mientras que los excesos captados pueden volver a la fuente. Existen unidades operando en el rango de filtración de 1.0 a 9.0 m/h, las cuales fueron evaluados en desarrollo del presente estudio.

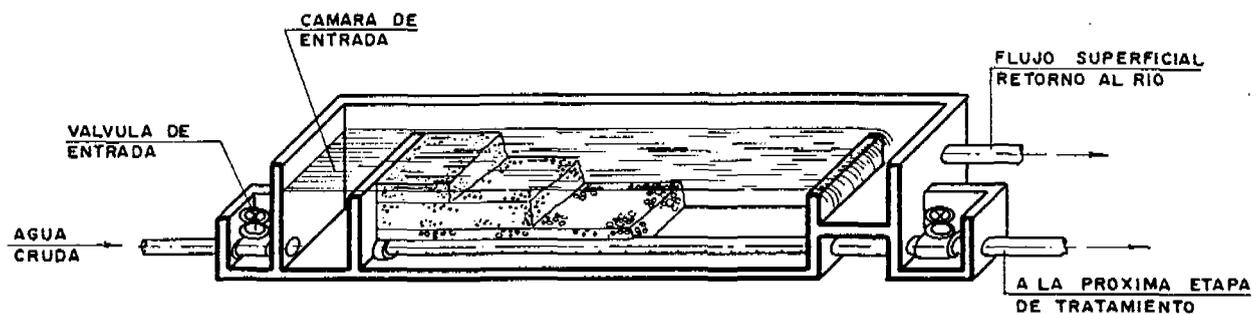


FIGURA 4.2 Esquema de un Filtro Grueso Dinámico

Bajo condiciones normales de operación, la capa de grava fina se obstruye gradualmente; cuando se presentan valores elevados de sólidos suspendidos de corta duración la obstrucción será mas rápida y eventualmente, dependiendo de las características de las partículas, la obstrucción puede ser total. La limpieza total de los lechos se hace en promedio 1 o 2 veces por semana, interrumpiendo el flujo hacia la siguiente unidad del tratamiento y rastrillando la capa de grava fina. Cada 6 a 12 meses el material filtrante debe ser removido, lavado y vuelto a instalar, de tal manera que se pueda mantener la capacidad de captación de agua de la unidad (Galvis et al., 1991, 1992).

#### 4.4.2 Filtros Gruesos de flujo Descendente

Desde comienzos del siglo se han utilizado filtros rápidos de flujo descendente en serie con unidades del FLA, en Europa y EEUU. Aunque esta alternativa se diferencia de la filtración rápida convencional en utilizar arenas más gruesas y no requerir la adición de productos químicos, todavía requieren retrolavado hidráulico frecuente para posibilitar la limpieza de los

lechos, lo cual limita su aplicación en localidades con escaso desarrollo tecnológico (Cleasby, 1991).

La filtración gruesa de flujo descendente a través de una matriz de piedra y arena tiene antecedentes en Rusia y ahora se investiga como alternativa de pretratamiento para trabajar en serie con unidades de FLA (Rajapakse et al., 1989). Las piedras tienen tamaño de 50 mm aproximadamente y en la parte inferior de los lechos ellas se encuentran inmersas en arena gruesa. De esta manera se crea una especie de filtro de dos etapas, donde la piedra puede retener una gran cantidad de sólidos con una pérdida relativamente baja de permeabilidad.

Una unidad experimental a escala piloto, con lechos de 1.3 m de profundidad, operando con velocidades de 0.5 m/h a 1.5 m/h con suspensiones de caolin en el rango de 100 a 5000 mg/l de sólidos suspendidos, produjo efluentes con concentraciones inferiores a 25 mg/l. De manera preliminar, Rajapakse et al., (1989), consideraron que esta tecnología podría utilizarse como único pretratamiento para fuentes superficiales con menos de 2000 mg/l de sólidos suspendidos, operando a 0.7 m/h.

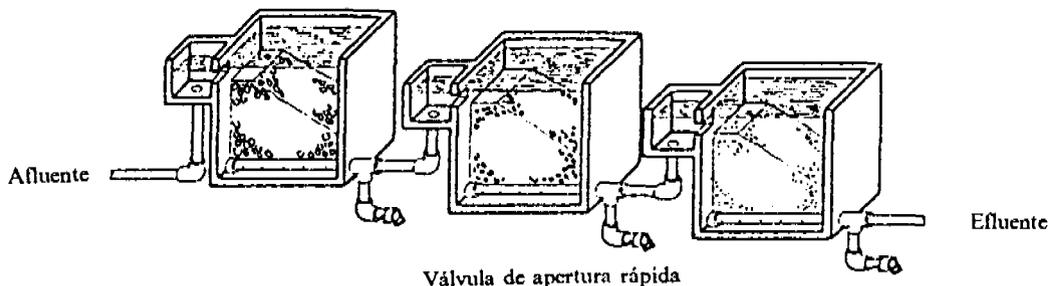
Esta alternativa parece tener un buen potencial como una de las etapas para el tratamiento de agua con alto contenido de sólidos. Sin embargo, su requerimiento de operación y mantenimiento pueden restringir su aplicación. Operando con 500 mg/l de sólidos suspendidos a una velocidad de 0.72 m/h el efluente empezó a presentar concentraciones superiores a 25 mg/l después de 16 horas de carrera. Aunque aproximadamente el 70% de los sólidos retenidos se remueven drenando la unidad, todavía es necesario retrolavar hidráulicamente para fluidizar y limpiar el lecho de arena.

#### **4.4.3 Filtros Gruesos de flujo Descendente en Serie (FGDS)**

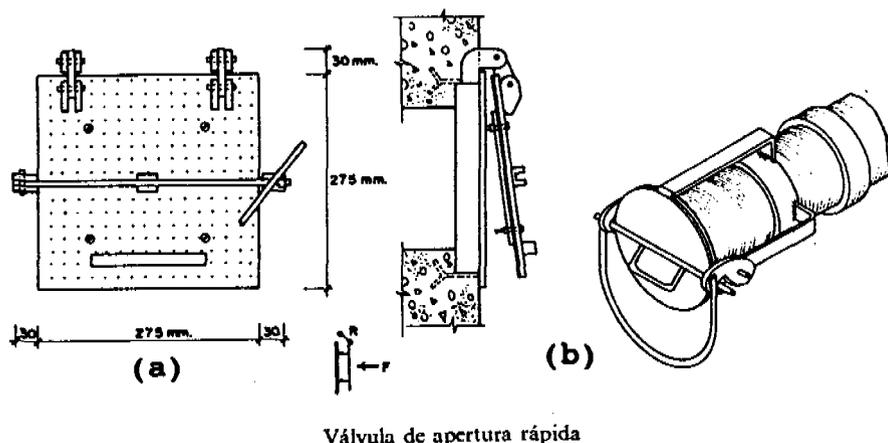
Esta alternativa tiene sus antecedentes en el sistema de filtración de Pueb-Chabal utilizado en París y en otras ciudades europeas a comienzos de este siglo (Elms, 1917; citado por Cleasby, 1991). En este sistema, el agua pasaba por tres o mas filtros en serie, comenzando por gravas de 25 mm, las cuales se iban reduciendo de tamaño en las siguientes unidades. Estas unidades operaban en serie con la tecnología de FLA.

Estudios realizados en Perú (Pérez et al, 1985; Pardon, 1989) y en Colombia (Galvis et al, 1987; Quiroga, 1988) han motivado un renovado interés en esta opción de pretratamiento. En la Figura 4.3 se presenta un esquema que ilustra un filtro grueso descendente con tres unidades en serie. Estas unidades tienen una capacidad moderada de almacenamiento de lodo lo que hace necesario su limpieza periódica. Esto se hace drenando la unidad mediante válvulas de apertura rápida conectadas a los múltiples que recolectan el agua filtrada por los lechos de

grava. En la Figura 4.4 se ilustran dos tipos de válvulas de apertura rápida desarrolladas en Perú y Colombia.



**FIGURA 4.3** Esquema de un Filtro Grueso de flujo Descendente en Serie (FGDS)



**FIGURA 4.4** Válvula de apertura rápida. Versión peruana (a), versión colombiana (b). (Wolters et al, 1989)

El estudio en Perú se realizó en tres unidades experimentales de 150 mm de diámetro. Cada unidad tenía 0.6 m de grava. Se utilizó grava de 12 a 50 mm. Se estudiaron velocidades de filtración en el rango de 0.1 a 0.8 m/h. La turbiedad natural del río Rimac durante el periodo de estudio estuvo alrededor de 50 UNT; en estas circunstancias las eficiencias de remoción fueron de 45% para la velocidad más alta de filtración y de 55% para la más baja. Después de agregar lodo decantado del agua cruda para preparar turbiedades artificiales en el rango de 200 a 300 UNT, las eficiencias estuvieron cerca del 70% para la velocidad más alta y del 90% para la más baja. Se recomendó una velocidad de 0.3 m/h para conseguir efluente con menos de 20 UNT (considerada adecuada para FLA) de fuentes con turbiedades menores de 300 UNT. Se observó también que se requería aumentar la velocidad de filtración a valores del orden de 90 m/h para transportar hacia el drenaje los lodos depositados en el lecho.

Con base en la información anterior se construyó una unidad a escala real con capacidad de 0.4 l/s operando a 0.3 m/h. Para turbiedades en el rango de 20 a 100 UNT la eficiencia promedio fue de 63 % y para el rango de 100 a 300 UNT la eficiencia alcanzó el 79%. El promedio de remoción de coliformes fecales fue de 66% (Pardon, 1987). Se tuvieron carreras de filtración en el rango de 3 a 7 semanas, aunque no se reportaron incrementos en la pérdida de carga de cada carrera. El sistema de filtros gruesos fue drenado mediante purgas hidráulicas cuando la eficiencia de remoción era inferior al 80% y la turbiedad en el efluente era superior a 20 UNT (Lloyd et al, 1986).

En Colombia también se realizaron estudios con unidades a escala piloto con unidades semejantes a la utilizadas en Perú pero con lechos de grava en el rango de 6-18 mm. Se utilizaron velocidades de 0.7 m/h. Por el diámetro de estas unidades ( 150 mm ) y los bajos caudales evaluados, la operación y el mantenimiento de estas unidades es exigente para obtener resultados confiables, particularmente si se tienen limitaciones de supervisión o monitoreo continuo. En estas condiciones se recomiendan unidades de mayor diámetro (Quiroga, 1988; Galvis et al, 1989).

Durante la evaluación preliminar de esta tecnología con agua del río Cauca en Cali, Colombia, la fuente presentó turbiedades en el rango de 20 a 100 UNT, color aparente en el rango de 200 UPC y nivel de coliformes fecales del orden de 100000 NMP/100 ml. La eficiencia en la remoción de turbiedad estuvo el rango de 50 al 90%; la del color aparente entre el 45 y el 85 % y el nivel de coliformes en el rango de 70 al 99% (Quiroga et al, 1988; Galvis et al, 1989).

Aunque la tecnología parece tener posibilidades como alternativa de pretratamiento, existe muy poca experiencia con ella a escala real, y la que existe a escala piloto resulta insuficiente para establecer sus posibilidades y limitaciones y unas guías preliminares de diseño. Velocidades de operación de 0.30 m/h tienen todavía un impacto importante en los costos de inversión inicial. No hay información clara, ni siquiera a nivel preliminar, sobre su potencial para superar otras limitaciones de la tecnología de FLA, como el representado por compuestos orgánicos, hierro o manganeso. Además se requieren estudios adicionales relacionados con el mantenimiento de las unidades. En Asia en vez de grava se utilizó fibra de la cáscara de coco como material filtrante (Frankel, 1974; Wolters et al, 1989), con lo cual turbiedad de agua afluente en el rango 25 a 130 UJT (Unidades Jackson de Turbiedad) fue reducida a menos de 1 UJT. Sin embargo, el medio filtrante debió ser reemplazado ser reemplazo una vez al mes ante la imposibilidad de limpiarlo en sitio.

#### 4.4.4 Filtros Gruesos de Flujo Ascendente

En esta alternativa el agua fluye de manera ascendente a través de una serie de lechos de grava de tamaño decreciente. Se pueden distinguir dos alternativas: **La Filtración Gruesa Ascendente en Capas (FGAC)**, cuando los lechos de grava son instalados en una misma unidad de filtración, como se ilustra en la Figura 4.5 (a), y la **Filtración Gruesa Ascendente en Serie (FGAS)**, cuando los lecho de grava son instalados en dos o tres unidades de filtración, cada una con un tamaño predominante de grava que decrece en el sentido del flujo (ver Figura 4.5 b). Estas unidades tienen una moderada capacidad de almacenamiento de lodo por lo que requieren limpiezas periódicas. Esto se hace mediante drenaje a gravedad para lo cual se utilizan válvulas de apertura rápida. El efecto de limpieza de estos drenajes puede ser mejorado mediante aperturas y cierres periódicos de la válvula de drenaje (Galvis et al, 1987).

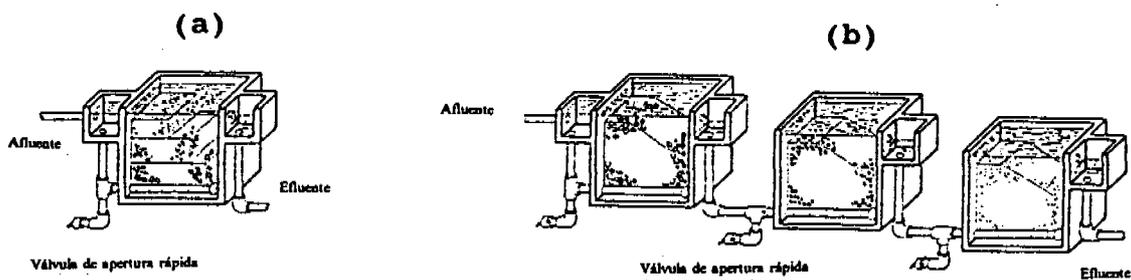


FIGURA 4.5 Esquemas de Filtros Gruesos Ascendentes, en Capas (a) y en Serie (b).

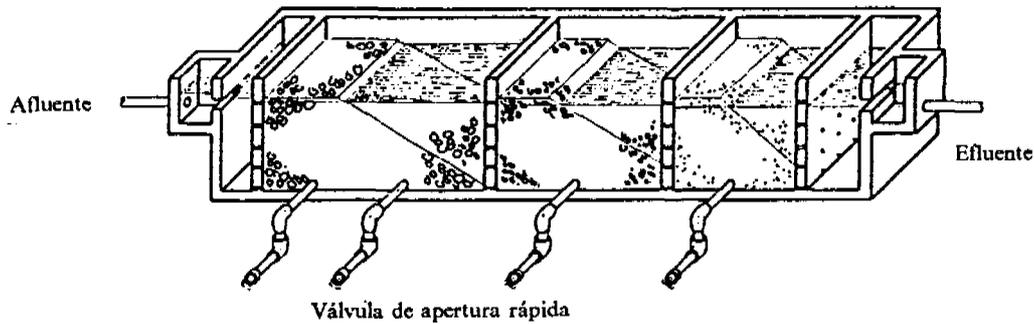
Ambas alternativas de filtración gruesa ascendente fueron evaluadas de manera preliminar en Cali, Colombia, aprovechando agua del río Cauca. Para la alternativa FGAS se utilizó un sistema de columnas de filtración en serie, cada una de 150 mm de diámetro, empacadas con gravas en el rango de 18 a 6 mm. La velocidad de operación fue de 0.7 m/h. Con valores de turbiedad en el rango de 20 a 100 UNT, de color de 50 a 200 UPC y de coliformes fecales del orden de 100000 NMP por 100 ml, los resultados obtenidos muestran remociones de turbiedad entre el 75 y 90%; de color aparente entre el 50 y 70 % y de coliformes fecales entre el 70 y 99.9% (Galvis et al, 1989; Wolters et al, 1989). La alternativa de FGAC, evaluada con la misma fuente mostró promedios de remoción más bajos.

La alternativa de FGAC se evaluó con otra fuente superficial de mejor calidad, con turbiedades promedio de 12 UNT y valores superiores a 100 UNT pero de corta duración (del orden de horas); con valores promedios de color real de 34 UPC y coliformes fecales de 1680 NMP/100 ml. las remociones promedio en la unidad de FGAC fueron: 69% para turbiedad; 45% para color real y 89% para coliformes fecales. Después de dos semanas de operación la resistencia al flujo era del orden de 25 cm y después de la limpieza hidráulica de la unidad esta resistencia se reducía a los valores iniciales, del orden de 7 cm. El drenaje hidráulico era complementado con una limpieza de la camada superficial de grava para controlar el crecimiento de algas. (Galvis et al, 1989).

#### 4.4.5 Filtros Gruesos de Flujo Horizontal

Las unidades de Filtración Gruesa Horizontal (FGH) se dividen normalmente en tres compartimientos de longitud decreciente, empacados con gravas también de tamaño decreciente. En los últimos treinta años esta alternativa de pretratamiento se ha utilizado, en combinación con lechos de arena, para la recarga artificial de agua subterránea en países como Alemania, Suiza y Austria (Wegelin, 1989). Se han realizado estudios sobre ella en Tailandia (Than et al., 1977), Tanzania (Wegelin, et al., 1981; Mbwette, 1983). Más recientemente, el International Reference Centre for Waste Disposal (IRCWD), con sede en Suiza, realizó estudios de laboratorio con unidades experimentales a escala piloto, procesando suspensiones con diferentes concentraciones de caolin (Wegelin, 1986). Este estudio continuó con un seguimiento a unidades a escala real, construidas en varios países, entre ellos Tanzania, Perú, Sudan y Colombia. En Colombia se construyeron una unidad experimental a escala piloto y tres a escala real, cuya evaluación ha continuado en el marco del Proyecto que motiva la presentación de este informe.

Esta alternativa se caracteriza por su gran capacidad de almacenamiento de lodos. En las primeras experiencias, las unidades se utilizaban hasta su colmatación, después de lo cual el material filtrante debía ser retirado, lavado y reinstalado. Más recientemente se ha introducido la posibilidad de limpieza hidráulica, con drenajes periódicos del agua almacenada en la unidad. Esto abre la posibilidad de construir unidades más pequeñas, con menores costos de inversión. En la Figura 4.6 se ilustra una unidad de FGH y en la Tabla 4.1 se presentan criterios preliminares de diseño para esta tecnología recomendados por Wegelin, (1989), con base en sus experiencias a escala piloto y las primeras experiencias a escala real.



**FIGURA 4.6 Esquema de un Filtro Grueso Horizontal**

**TABLA 4.1 Criterios preliminares de diseño de los Filtros Gruesos Horizontales. (Wegelin, 1989)**

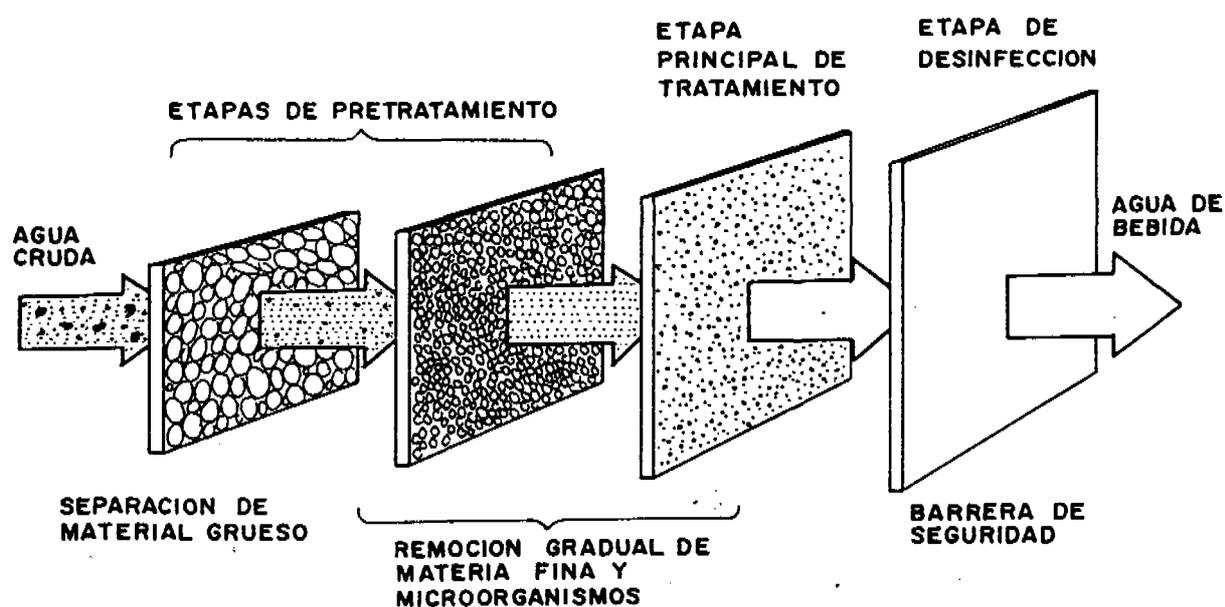
Máxima concentración ( $C_0$ ) de sólidos suspendidos (mg/l)	> 300 Alta	100 - 300 Media	< 100 Baja
Velocidad de filtración (m/h)	0.5	0.75 - 1.00	1.00 - 1.50
Longitud de lechos para:			
Diámetro grava de:			
20 mm	3 - 5	3 (*)	3 (*)
15 mm	2 - 5	2 - 4	2 - 3
10 mm	2 - 4	2 - 3	2
5 mm	1 - 2	1 - 2	1
Máxima concentración ( $C_e$ ) de sólidos suspendidos en el efluente	5	2 - 3	2

(\*) Esta fracción de grava puede ser omitida.

En Sudan se captó agua en un canal de irrigación con turbiedades máximas de 2000 UNT. Después de sedimentación simple la turbiedad fué reducida a 1000 UNT y después de la FGH la turbiedad estuvo en el rango de 5 a 20 UNT (Wegelin, 1989). Las unidades de FGH tenían 10 m de longitud y operaban con una velocidad de 0.75 m/h.

#### 4.5 COMBINACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO. CONCEPTO DE TRATAMIENTO INTEGRADO.

Conceptos básicos de tratamiento de agua establecen la conveniencia de separar primero el material más pesado o de mayor tamaño y gradualmente ir separando o inactivando el material más pequeño, representado por partículas que incluyen sólidos coloidales o microorganismos. Fuentes de agua superficial, con impurezas de naturaleza y tamaños diferentes, pueden ser tratadas ventajosamente combinando varias de las alternativas de pretratamiento antes revisadas, en serie con unidades de filtración lenta en arena. El efluente de estos sistemas debe ser de muy buena calidad e idealmente, en aquellas regiones donde resulte viable, se debe aplicar la desinfección terminal como barrera de seguridad, según se estableció en el capítulo 3. Esta situación se ilustra en la Figura 4.7.



**FIGURA 4.7** Combinación de alternativas o etapas de pretratamiento y tratamiento que permiten la operación de la desinfección terminal como barrera de seguridad.

En la combinación de posibles alternativas de pretratamiento, es importante tener en cuenta otro concepto, conjuntamente con el de multibarrera enunciado en el Capítulo 3, el de **tratamiento integrado**, según el cual las posibilidades y limitaciones de cada etapa o barrera para remover los distintos tipos de contaminantes deben ser cuantificadas y balanceadas, de tal manera que todos los contaminantes puedan ser removidos eficientemente (Lloyd et al, 1991). La sedimentación simple de corta duración, por ejemplo, procesando agua con valores elevados

de sólidos suspendidos, puede representar buenas eficiencias, pero aún así requerirá de otra etapa de pretratamiento, como una de las alternativas de filtración gruesa, para proteger la actividad biológica necesaria para obtener los mejores resultados en las unidades de FLA. La existencia de una etapa preliminar de acondicionamiento, antes de la filtración gruesa, podría potencializar otros mecanismos de tratamiento, que en condiciones normales podrían estar siendo inhibidos por los niveles de sólidos suspendidos que entran a la unidad.

#### 4.6 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION SOBRE PRETRATAMIENTOS

La aplicación conjunta de los **conceptos de multibarrera y de tratamiento integrado** hacen necesario conocer el comportamiento de las diferentes unidades de pretratamiento o tratamiento como parte de un sistema de potabilización de agua que permita su adecuada selección, combinación y diseño, en armonía con el riesgo sanitario presente en la fuente y en las normas vigentes de calidad de agua para consumo humano.

Las alternativas de pretratamiento se han desarrollado principalmente con el estímulo de la necesidad de superar las limitaciones de la tecnología de FLA relacionadas con los valores altos de turbiedad o de sólidos suspendidos y aún para este criterio, no existen guías orientadas a facilitar la adecuada selección y la combinación de las diferentes etapas de pretratamiento. Esta situación es semejante para otros parámetros tales como: nivel de coliformes fecales o color real, sobre los cuales la evidencia sobre tratabilidad, particularmente con la alternativa de filtración gruesa, es más reciente.

Otro importante limitante para promover una actitud crítica y creativa en el aprovechamiento de las diferentes alternativas de pretratamiento, particularmente, la opciones de filtración gruesa, lo constituye la falta de información sobre cada una de ellas en condiciones comparables, que permitan establecer los rangos en que cada opción resulte económicamente más competitiva, considerando tanto costos de inversión como de operación y mantenimiento.

Además, la experiencia con unidades experimentales a escala técnica orientadas a obtener datos frecuentes y de calidad confiable, deben ser verificados en relación con la selección y el aprovechamiento de diferentes alternativas tecnológicas operadas y mantenidas por personal rural, con bajo nivel de escolaridad.

## 5 OBJETIVOS

### 5.1 OBJETIVO GENERAL

Investigar y promover alternativas de pretratamiento de agua que no requieran la dosificación de químicos y que permitan superar las limitaciones de la tecnología de filtración lenta en arena, originadas en características de calidad de agua en las fuentes de abastecimiento.

### 5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

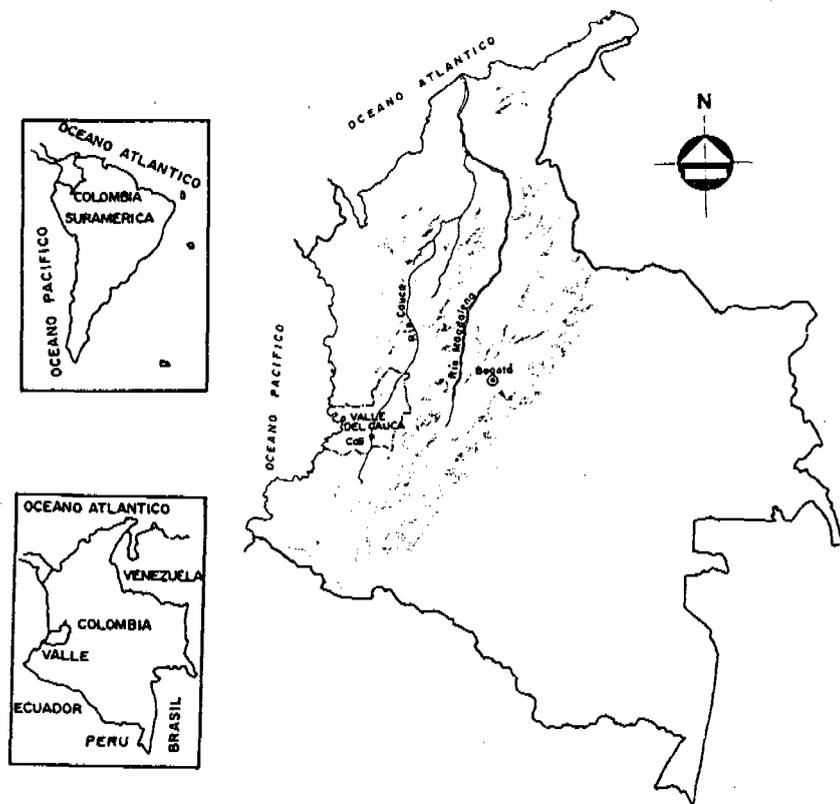
La necesidad de alternativas tecnológicas para la potabilización de agua, junto a las actividades preliminares de promoción, se reflejaron en la construcción de varios proyectos de demostración a escala real. Tanto la infraestructura construida en la vecindad de las unidades experimentales a escala piloto, como los proyectos de demostración, facilitaron las actividades de evaluación y permitieron ampliar el alcance de los objetivos específicos inicialmente propuestos, según se establece a continuación:

- i) Evaluar la aplicación de los conceptos de multibarrera y de tratamiento integrado de agua en unidades experimentales a escala piloto y en proyectos de demostración a escala real, administrados, operados y mantenidos por organizaciones comunitarias de nivel local.
- ii) Investigar diferentes alternativas de pretratamiento orientadas a producir criterios de selección, diseño, operación y mantenimiento que posibiliten su mejor y más amplio aprovechamiento.

Además, para enriquecer la componente de promoción del objetivo general, se publicó un manual en inglés que presenta una revisión del estado del arte en alternativas de pretratamiento que no requieren la dosificación de compuestos químicos. Con base en los resultados presentes se publicará un manual en español que incluirá las guías preliminares de selección, diseño, operación y mantenimiento con énfasis en las diferentes alternativas de filtración gruesa.

## 6 INFRAESTRUCTURA PARA LA REALIZACION DEL PROYECTO

El Proyecto se desarrolló con base en unidades experimentales operadas y mantenidas por el grupo ejecutor y en proyectos de demostración a escala real operadas y mantenidas por operadores a cargo de organizaciones comunitarias o administradores del nivel local. Toda esta infraestructura se encuentra en el departamento del Valle del Cauca, en el suroccidente de Colombia, según se ilustra en la Figura 6.1. El sistema de unidades experimentales es alimentada con agua del río Cauca, mientras que los proyectos a escala real se alimentan con agua de diferentes ríos que drenan las laderas del Valle.



**FIGURA 6.1** Localización de Colombia, el departamento del Valle del Cauca y la ciudad de Cali, sede de CINARA.

Para facilitar la interpretación y discusión de los resultados del presente Proyecto, se presentan a continuación algunas consideraciones sobre el valle geográfico del río Cauca.

El valle geográfico del río Cauca se encuentra en el suroccidente de Colombia y en su mayoría hace parte del departamento del Valle del Cauca. El Valle está a una altura de 950 m. sobre el nivel del mar y está ubicado entre las cordilleras Occidental y Central, las cuales en la región del Valle, tienen una altura promedio de 2500 m y 3500 m. respectivamente. El ancho promedio del Valle en la parte sur es de 30 km y en la parte norte de 10 km.

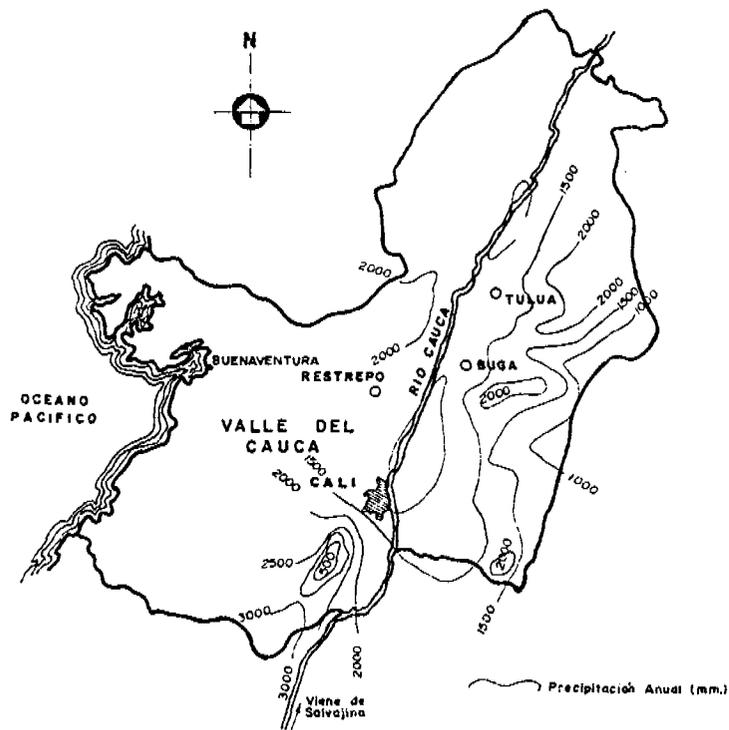
El río Cauca nace en la cordillera Central y tiene una longitud de 1350 km. En sus primeros 130 km fluye con una pendiente promedio de 5 m/km y después recorre de sur a norte los 400 km de longitud del Valle del Cauca con una pendiente de 0.4 m/Km. Desde Enero de 1985 el embalse de Salvajina, localizado 24 Km. antes del Valle, regula parcialmente el caudal del río.

La historia geológica del Valle muestra varios períodos durante los cuales el piso estuvo cubierto por un lago. Los sedimentos depositados durante esas épocas fueron eliminados por erosión y ahora el área está cubierta con depósitos aluviales jóvenes (Haggström, 1989). De otra parte, solo una pequeña región de las zonas montañosas está cubierta de bosques principalmente por dos razones: las altas pendientes y la deforestación.

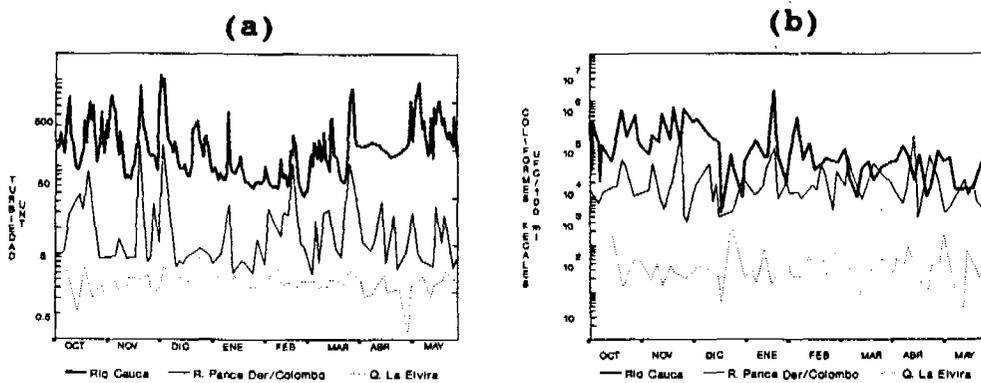
El Valle está localizado dentro de la zona de influencia de la Convergencia Intertropical. Como consecuencia de esto presenta dos periodos secos en el año, que van de enero a marzo y de julio a septiembre y dos periodos lluviosos que se extienden de abril a junio y de octubre a diciembre, siendo este segundo regularmente el más severo. Como se ilustra en la Figura 6.2, la precipitación anual media tiene sus valores máximos en las laderas de las montañas (2500 mm.) y sus valores mínimos en los páramos y en la planicie del Valle al norte de Cali (1000 mm.). La mayoría de las lluvias son de origen convectivo y orográfico y durante las tormentas fuertes entre el 80% y el 90% de la precipitación cae durante las dos o tres primeras horas de lluvia.

En términos generales, en la región del Valle del cauca, se distinguen tres tipos de calidad de agua en las fuentes superficiales. En la Figura 6.3 se presenta el comportamiento de la turbiedad (a) y de los coliformes fecales (b) para tres fuentes, río Cauca, Pance (derivación Colombo Británico) y quebrada La Elvira durante el periodo octubre de 1990 a mayo de 1991. Estas dos Figuras muestran los diferentes riesgos en cada una de las fuentes. El río Cauca cuenta con una alta contaminación en turbiedad y coliformes fecales, mientras que el río Pance, presenta altos recuentos de coliformes fecales pero una moderada turbiedad, y la quebrada La Elvira, presenta niveles de contaminación bajos tanto en turbiedad como en coliformes fecales.

Estos tres tipos de calidad de agua disponibles en una misma región sustentan la importancia de establecer el potencial y las limitaciones de diferentes alternativas de pretratamiento para promover su apropiada utilización.



**FIGURA 6.2** Precipitación media (mm/año) en la cuenca del alto Cauca



**FIGURA 6.3** Niveles de turbiedad (UNT) (a) y coliformes fecales (b), para tres diferentes fuentes superficiales. Octubre 1990 a mayo 1991. Proyecto PRETRATAMIENTOS.

La temperatura ambiente media anual en el Valle es de 24°C con bajas fluctuaciones estacionales y variaciones diarias del orden de los 10°C en la zona plana. La humedad promedio en la planicie del Valle es de 70 a 75% con una variación estacional pequeña, a pesar de la gran variación en la precipitación.

El Valle del Cauca, con una población que supera los tres millones de habitantes, tiene un importante papel en los programas de desarrollo social y económico de Colombia, entre otras razones, por el desarrollo del Valle geográfico y por su vecindad con Buenaventura, puerto nacional en la cuenca del Pacífico. La ciudad de Cali, capital del Valle, es el tercer núcleo poblado del país con 1.5 millones de habitantes.

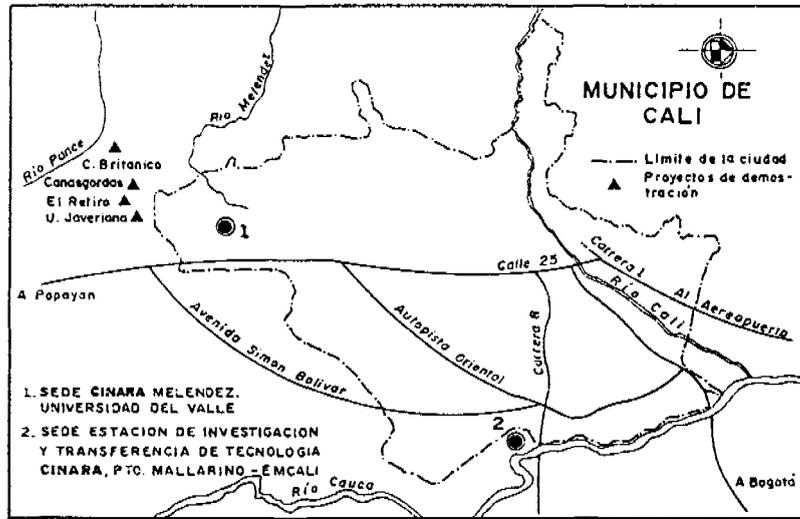
El río Cauca tiene una longitud total de 1200 Km y drena 60000 Km<sup>2</sup>, de los cuales 3600 Km<sup>2</sup> se encuentran antes del embalse de Salvajina, donde el río presenta un caudal medio de 140 m<sup>3</sup>/s. Puerto Mallarino se encuentra 125 Km. Adelante del embalse de Salvajina, unos 100 Km. después del cual el río adquiere una pendiente suave en el valle geográfico y hasta allí, ha drenado un total de 8584 Km<sup>2</sup> y presenta un caudal medio de 278 m<sup>3</sup>/s. El embalse permite elevar los caudales mínimos del río de 40 a 130 m<sup>3</sup>/s, aliviando un poco el impacto de la contaminación en el verano. El efecto del embalse en la calidad físico-química del agua del río en invierno es más limitado, pues aguas abajo de él se encuentran importantes tributarios, como el río Palo, el cual contribuye significativamente en la época de crecientes al caudal y a la calidad del agua en Puerto Mallarino.

## **6.1 ESTACION DE INVESTIGACION Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA APLICADA AL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA.**

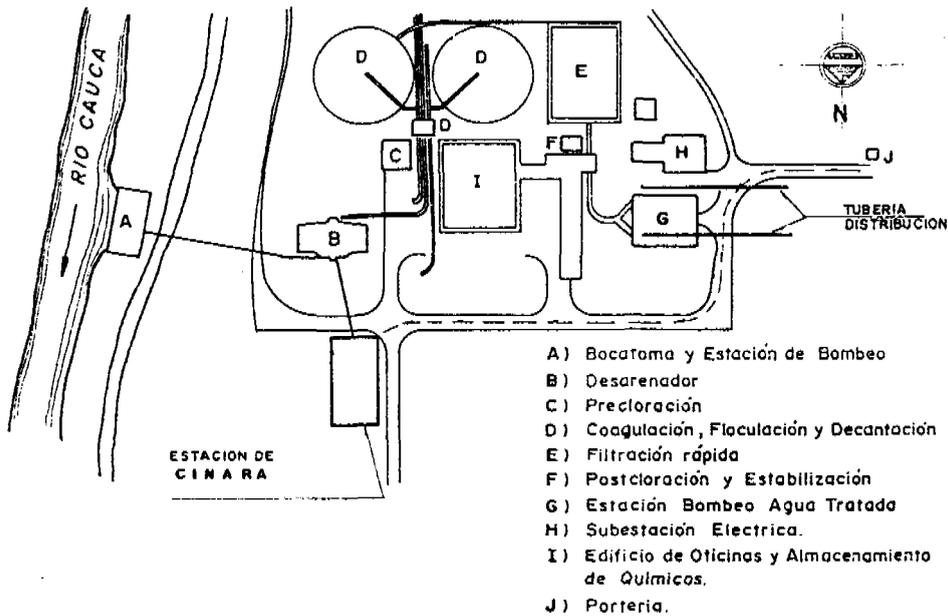
El sistema de unidades experimentales utilizadas en el Proyecto se encuentran localizadas en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de CINARA, localizada en predios de las Empresas Municipales de Cali, EMCALI, en la planta de tratamiento de agua de Puerto Mallarino, a media hora en carro de la sede principal de CINARA en Meléndez, en predios de la Universidad del Valle. La localización de esta infraestructura en la ciudad de Cali se ilustra en la Figura 6.4 y la localización de la Estación en predios de la Planta de Puerto Mallarino, en la Figura 6.5.

La Estación cuenta con una infraestructura de apoyo consistente en laboratorios para análisis básicos de calidad físico-química y bacteriológica del agua junto con oficinas para el equipo de trabajo que labora en la Estación, la cual en su primera etapa se desarrolló dentro del presente Proyecto. En desarrollo del segundo Período, la Estación se amplió en 1991 haciendo énfasis en las actividades de transferencia de conocimiento, para facilitar el trabajo de equipo con otros grupos de trabajo o centros cooperantes y en un futuro se prevé un tercer período

que, además de cualificar los desarrollos anteriores, se orientaría a combinar alternativas de pretratamiento con tecnologías más convencionales de potabilización de agua y de aprovechamiento usual en municipios grandes e intermedios. (Ver Figura 6.6).



**FIGURA 6.4** Localización e infraestructura de CINARA en Meléndez, Universidad del Valle (1) y en Puerto Mallarino, EMCALI (2).



**FIGURA 6.5** Localización de la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de CINARA, en predios de la Planta de Potabilización de Puerto Mallarino, EMCALI.

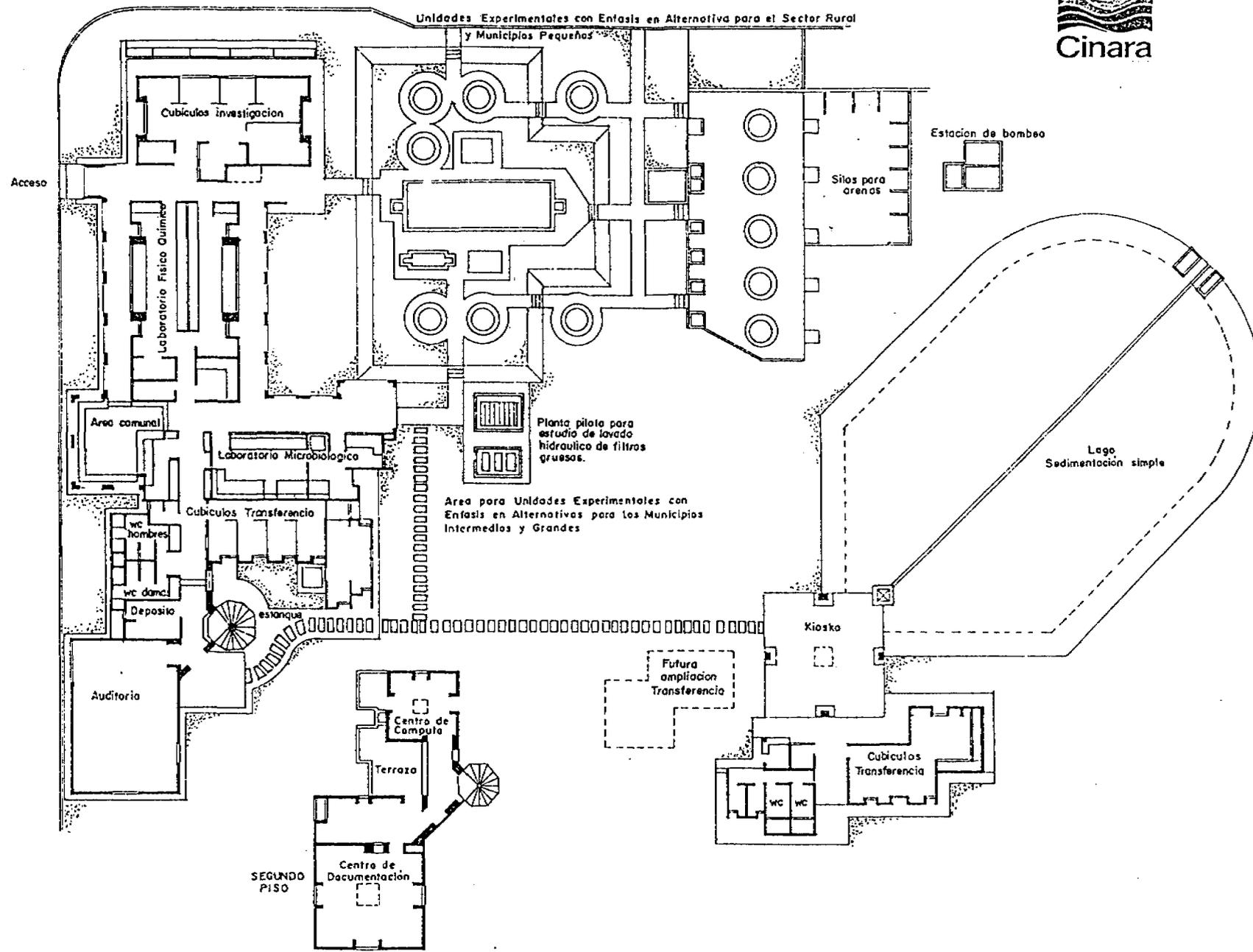


FIGURA 6.6 Estación de Investigación y Tranferencia de Tecnología CINARA , Puerto Mallarino, Cali , Colombia .

## 6.2 PROYECTOS A ESCALA REAL

En el marco de los convenios **CINARA - Universidad del Valle - IRC - Ministerio de Salud** y en colaboración con diferentes instituciones del sector de agua y saneamiento en Colombia, **CINARA** ha participado en el mejoramiento de algunos sistemas de abastecimientos de agua que incluyen la tecnología de FLA, trabajando en serie con diferentes alternativas de pretratamiento. Estos sistemas están localizados en el Valle geográfico del río Cauca.

Aunque la metodología inicialmente propuesta para la realización del Proyecto no incluía el estudio de alternativas de pretratamiento a escala real, se consideró muy conveniente hacer un seguimiento sistemático a varias de estas plantas para complementar la información que se estaba obteniendo en la Estación de Investigación. Para una evaluación continua se seleccionaron siete de esas plantas, situadas en el sur de la ciudad de Cali y en el Norte del Valle.

El diferente grado de riesgo sanitario que presentan estas fuentes sustentan la importancia de establecer el potencial y las limitaciones de diferentes alternativas de tratamiento para promover su apropiada utilización.

Las plantas del sur de Cali: El Retiro, Cañas Gordas, Universidad Javeriana y Colegio Colombo Británico, son abastecidas por la misma fuente de agua, el Río Pance. Sin embargo, la bocatoma de cada planta está localizada en diferentes derivaciones del río, las cuales en su recorrido hasta la planta de tratamiento tienen diferentes riesgos de contaminación lo cual se refleja en su calidad de agua.

El río Pance es una fuente intervenida por el hombre, la cual ha sido desforestada y utilizada como receptora de desechos domésticos y de minas de carbón limitando su uso como agua de consumo humano. La cuenca del río Pance tiene una extensión aproximada de 8975 hectáreas y se encuentra localizada en la vertiente oriental de la cordillera occidental.

Las plantas del norte del Valle, CIDER- Restrepo, Ceylan-Bugalagrande y La Marina-Tulúa, son abastecidos por fuentes de diferentes calidades de agua. El río Morales es la fuente de agua de la planta la Marina, el río Bugalagrande, de la planta de Ceylán y la quebrada Calimita abastece la planta de CIDER.

En el aparte 7.2 se ilustra la localización y se amplía la información sobre estos siete proyectos a escala real incluidos en el desarrollo del presente estudio.

## 7 DESARROLLO DEL PROYECTO

### 7.1 PLANTAS PILOTO

El Proyecto se orientó principalmente a estudiar comparativamente varias alternativas de pretratamiento en medios gruesos, las cuales constituyen las líneas principales de la investigación. Ellas son: Filtración Gruesa Ascendente en Serie (FGAS), Filtración Gruesa Ascendente en Capas (FGAC), Filtración Gruesa Horizontal (FGH) y Filtración Gruesa Descendente en Serie (FGDS).

Cada una de estas líneas incluyó una unidad de prueba de Filtración Lenta en Arena (FLA). Además, y en armonía con los conceptos de multibarrera y tratamiento integrados enunciados previamente, las líneas de pretratamiento en medios gruesos están precedidas por una etapa de acondicionamiento orientada a estudiar modalidades económicas de reducir el impacto de los sólidos más gruesos en los componentes más costosos del sistema.

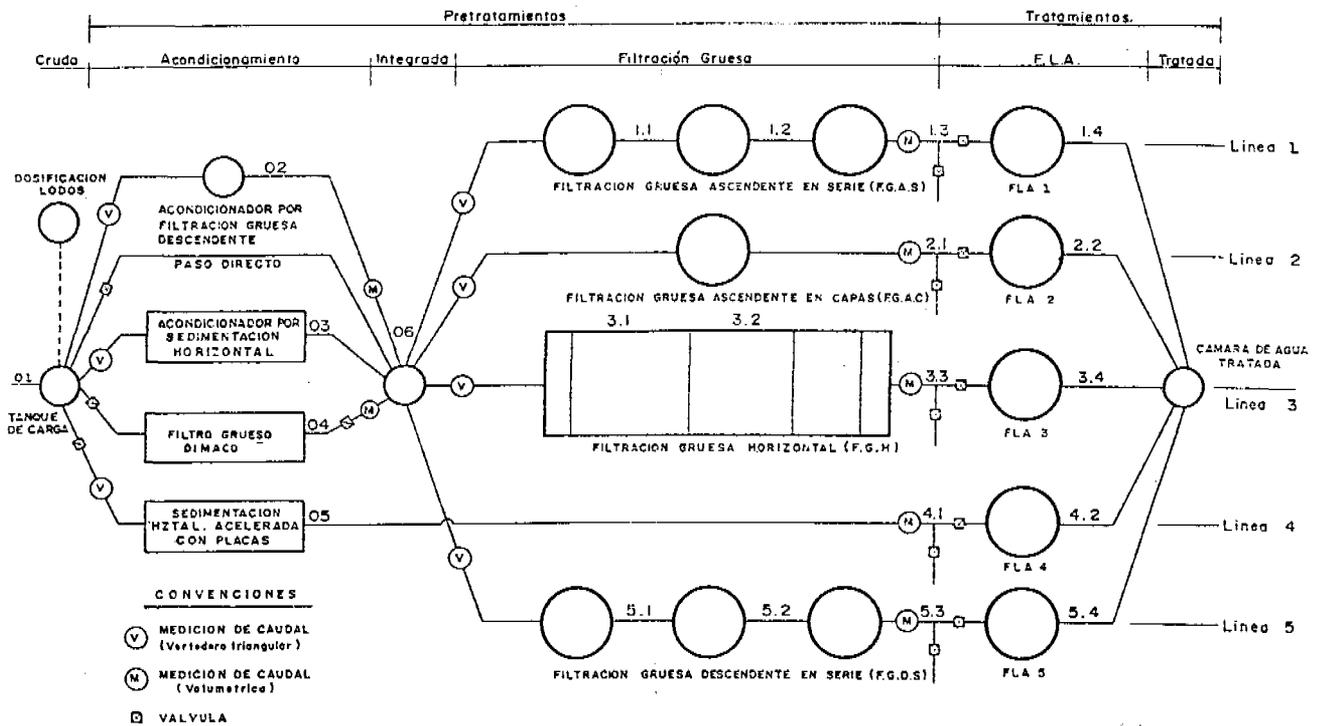
El Proyecto se desarrolló en cuatro Periodos de evaluación. El primer periodo se orientó a la familiarización y al entendimiento de la tecnología, además de la selección de las alternativas de acondicionamiento más favorables. En los Periodos II, III, y IV se chequearon diferentes velocidades y se adecuaron las unidades con lechos filtrantes más finos y mayores tiempos teóricos de retención.

#### 7.1.1 Periodo I

Este Periodo se desarrolló entre enero 16 y septiembre 28 de 1990.

Como se ilustró en la Figura 6.5, el agua del río Cauca es bombeada desde la captación (A) hasta la entrada a los desarenadores (B), desde donde es captada antes de recibir tratamiento alguno de parte de EMCALI, excepto por el cribado de material grueso realizado para proteger las bombas en (A). Desde la entrada a (B) el agua cruda fluye a gravedad hacia el sistema de unidades de prueba del Proyecto, cuyo diagrama de flujo en el periodo I se ilustra en la Figura 7.1.

Las unidades de prueba se han agrupado en bloques de acondicionamiento, filtración en medios gruesos y filtros lentos de arena. En el bloque de acondicionamiento se evaluaron comparativamente las siguientes alternativas de acondicionamiento:



**FIGURA 7.1 Diagrama de flujo del sistema de Unidades de Prueba de la Fase I del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.**

- (i) Con lechos en grava:
  - Filtración Gruesa Descendente (AFGD) - (02)
  - Filtración Gruesa Dinámica (FGDi) - (04)
- (ii) Con Sedimentación Simple:
  - Sedimentación Horizontal sin Placas (ASH) - (03)
  - Sedimentación Horizontal con placas (SHAP) - (05)

Como se ilustra en la Figura 7.1 el agua acondicionada se integra en el punto (06), excepto aquella correspondiente al sedimentador de placas (05) que alimenta directamente el FLA 4. De esta manera, la línea 4 puede ser considerada como línea de control, sin pretratamiento por filtración gruesa, en comparación con las otras cuatro líneas que incluyen tanto Unidad de FLA, como alternativa de pretratamiento: FGAS, FGAC, FGH y FGDS.

El perfil hidráulico de la línea con FGAS para ilustrar la forma en que fluye a gravedad el agua desde la etapa de acondicionamiento hasta la etapa de tratamiento se presenta en la Figura 7.2.

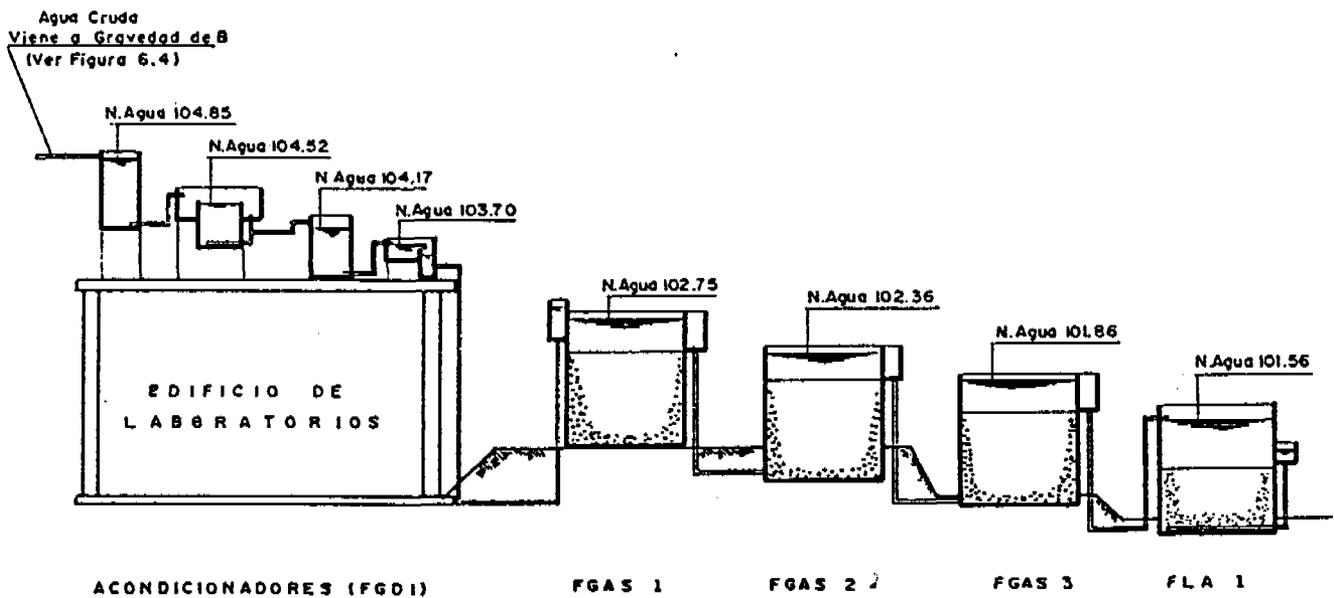


FIGURA 7.2 Perfil hidráulico de la línea con Filtración Gruesa Ascendente en Serie (FGAS).

#### 7.1.1.1 Puntos y frecuencias de muestreo para análisis de calidad de agua.

Los puntos de muestreo se consideraron en el agua cruda y en los efluentes de las unidades evaluadas. Estos puntos se muestran en la Figura 7.1. Aunque inicialmente se incluyeron muestreos en los puntos 3.1 y 3.2 correspondientes al FGH, estos se excluyeron posteriormente por su dificultad en la toma de la muestra. En la Tabla 7.1 se presentan las frecuencias de muestreo. Estas frecuencias son el resultado de un análisis detallado de costos, disponibilidad de equipos y personal, y de normas establecidas para determinar eficiencias de un sistema de tratamiento.

**TABLA 7.1**

**Frecuencia y puntos de muestreo para análisis de calidad de agua.  
Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.**

PUNTO DE MUESTREO			1.1	1.2	1.3	1.4	Cantidad	
	02				2.1	2.2	total de pruebas	
PARAMETRO	01	03	06	3.1	3.2	3.3	3.4	y
		04					4.1	análisis
		05		5.1	5.2	5.3	5.4	
-Color real (UPC)	24d	d	2d	d	d	2d	d	49d
-Turbiedad (UNT)	24d	d	2d	d	d	2d	d	49d
-Sólidos sedimentales (ml/h)	d	d	d	d				6d
-Sólidos suspendidos (mg/l)	3s	3s	3s	3s	3s	3s		48s
-Temperatura (°C)	d		2d			2d	d	16d
-Pérdida de carga hidráulica (cm)	s	d(exc. 03-05)		d	d	d	d	17d
-Caudal (l/s)	d	d		d		d(*)	d	14d
-pH (Unidades)	d		d			d	d	11d
-Alcal. total (mg/l Ca CO <sub>3</sub> )	s		s			s	s	11s
-Dureza total (mg/l Ca CO <sub>3</sub> )	s		s			s	s	11s
-Oxígeno disuelto (mg/l)	d		d			d	d	11d
-DQO (mg/l)	m		m			m		6m
-Coliformes fecales (UFC/100 ml)	s	s	s	m	m	s	s	15s,6m
-Estreptococos fecales (UFC/100 ml)		s	s	m	m	s	s	15s,6m
		s						

d = diaria

s = semanal

q = quincenal

m = mensual

exc = excepto

(\*) Sólo el 2.1

Se evaluaron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que permiten evaluar la calidad del agua y la eficiencia de los sistemas. A continuación se especifican las razones tenidas en cuenta en la selección de algunos parámetros en los cuales hizo énfasis la investigación:

**Turbiedad:** Este parámetro es universalmente utilizado para la evaluación de los sistemas de tratamiento, siendo de gran importancia, por estar relacionado con el nivel de partículas de diferente tamaño presentes en el agua tanto coloidales como suspendidas que frecuentemente están asociadas a una alta contaminación bacteriológica.

**Sólidos suspendidos:** Indicador de partículas de tamaño superior a 1 micra. Para los sistemas de FLA este es un parámetro de gran importancia, pues de la concentración de ellos en el efluente de los pretratamientos en medios gruesos depende grandemente la eficiencia y duración de las carreras de los FLA.

**Color real:** El cual es debido a la presencia de materia orgánica coloreada e inorgánica como hierro y manganeso. Aunque es de difícil remoción por FLA, de acuerdo a estudios anteriores, el ser un indicador indirecto de la presencia de sustancias húmicas y fulvicas que afectan la calidad del agua tratada hace indispensable su realización orgánicas coloreadas, por lo general húmicas, metales como el hierro y el manganeso. En vista de que estudios anteriores han demostrado que el color real es un parámetro de difícil remoción por FLA, su análisis es indispensable para verificar este comportamiento.

**DQO:** como indicador de presencia de materia orgánica, ya que COT, parámetro inicialmente propuesto, no pudo realizarse por limitaciones de equipo.

**Coliformes fecales:** Dado que la principal causa de las enfermedades entéricas del hombre son los microorganismos patógenos, y que el mecanismo más común para la transmisión de dichos organismos es la contaminación del agua por excrementos humanos y animales, se hace indispensable cuantificar la presencia de indicadores de contaminación fecal. El indicador que por excelencia ha sido usado para determinar el grado de contaminación bacteriológica de un agua son los Coliformes fecales, un grupo de organismos entéricos fácilmente aislables e identificables.

**Estreptococos fecales:** indicadores de contaminación fecal, como complemento a la información de los coliformes por permanecer más tiempo en el agua.

#### 7.1.1.2 Especificaciones de diseño.

Los criterios del diseño de las unidades de prueba y las especificaciones de los lechos de grava y arena con que se empacaron las unidades se presentan en la Tabla 7.2. Estos criterios se

TABLA 7.2 Parámetros de Diseño y Especificaciones de Lechos Filtrantes de las Plantas Piloto del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período I.

PARAMETRO DE DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DE LECHOS FILTRANTES	LINEAS DE PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO														
	ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO				ETAPA DE PRETRATAMIENTO EN FILTRACION GRUESA										ETAPA CON FILTRACION LENTA
	AFGD	FBDi	ASH	SHAP	FGAS			FGAC	FGH			FGDS			
					1	2	3		1	2	3	1	2	3	FLA
. Area (m <sup>2</sup> )	0.99	0.75	0.94	0.54	3.14	3.14	3.14	3.14	4.02	4.02	4.02	3.14	3.14	3.14	3.14
. Velocidad en dirección del flujo Captado (m/h)	4.0	1.50	22.5	14.04	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.15
. Longitud de los Lechos Filtrantes (m)								0.30							
Grava 25 - 38 mm.					0.30	0.30	0.30	0.20				0.80	0.30	0.30	
Grava 19 - 25 mm.	0.20	0.20			0.50			0.15	3.00	0.10	0.10	0.20	0.50	0.20	
Grava 13 - 19 mm.	0.20	0.20			0.20	0.50		0.15		1.50	0.30		0.20	0.30	
Grava 6 - 13 mm.	0.20	0.20				0.20	0.40	0.20		1.00	0.60			0.20	
Grava 3 - 6 mm.							0.30								
Grava 2 - 3 mm.															
Arena Gruesa (D <sub>10</sub> =2 mm)												0.60			
Arena FLA (Cu=1.57 D <sub>10</sub> = 0.23 mm)*															
Lecho filtrante útil (m)	0.60	0.60	(**)	(***)	1.00	0.70	0.70	1.00	3.27	2.32	1.55	1.00	0.70	0.70	1.00

\* Cu: Coeficiente de desuniformidad: D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub>  
D<sub>10</sub>: Diámetro efectivo (mm)

\*\* Longitud = 2.85 m  
\*\*\* Longitud = 1.20 m

basan en la revisión de la escasa literatura y de las experiencias anteriores por parte de CINARA - IRC en pequeñas plantas piloto. ( CINARA-IRC, 1989).

### 7.1.1.3 Criterios de mantenimiento

En la Tabla 7.3 se presentan los criterios tenidos en cuenta para el mantenimiento de las unidades de prueba en este periodo. Estos criterios se han desarrollado con base en la información de la literatura y la experiencia obtenida en investigaciones anteriores llevadas a cabo por CINARA -IRC (1989).

**TABLA 7.3 Criterios de Mantenimiento de las Unidades de prueba del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.**

Unidad	Criterio	Sistema de Lavado
AFGD	Pérdida de carga máxima: 0.20 m	Lavado superficial de la primera capa de grava. Descargas de fondo (# variable) hasta mejora en la calidad de agua de lavado.
ASH	Tiempo: 2 semanas	Lavado de interior de estructura. Remoción de lodo acumulado.
FGDi	Reducción de caudal o pérdida de carga (máx: 0.24m)	Lavado superficial de la primera capa de grava. Descargas de fondo (# variable) hasta mejora en la calidad de agua de lavado o recuperación de caudal de diseño.
SHAP	Tiempo: 2 semanas	Lavado interior de la estructura. Remoción de lodo acumulado.
Filtros Gruesos	(4) Pérdida de carga máxima en primeras etapas. Tiempo: 3 semanas. (5) Tiempo: cada 15 días	Lavado superficial de la primera capa de grava 1 descarga de fondo hasta mejora en la calidad del agua de lavado. 3 impactos y descarga de fondo a 2 m bajo nivel inferior de unidad.
Filtros Lentos	Pérdida de carga máxima 0.82 m	Raspado de la capa superficial de arena.

### 7.1.2 Periodos II, III y IV

Consecuentemente con los resultados del Periodo I y con las perspectivas del Proyecto, se hicieron ajustes al sistema de unidades de prueba los cuales se ilustran en la Figura 7.3 y se resumen a continuación :

- (i) Se decidió estudiar la alternativa de lechos filtrantes dinámicos bajo diferentes velocidades de filtración, como único sistema de acondicionamiento ya que fue la alternativa que presentó el mejor potencial para reducir el nivel de sólidos con bajos períodos hidráulicos de retención.
- (ii) Se adicionó una línea modificada de la tecnología de Filtración Gruesa Horizontal identificada como FGHM, con su correspondiente unidad de FLA, procurando estudiar la alternativa de FGH bajo condiciones más comparables de longitudes útiles de filtración en grava en relación con las alternativas de FGAS y FGDS.
- (iii) Se varió la velocidad de filtración en los sistemas de filtración gruesa disminuyéndose a 0.3 m/h para el **Periodo II** (enero 1 a julio 14 de 1991), Posteriormente la velocidad se incrementó a 0.45 m/h, considerándose como el **Periodo III** (julio 15 de 1991 a enero 21 de 1992) y finalmente se llegó a una velocidad de 0.6 m/h en el **Periodo IV** (enero 22 a julio 14 de 1992).

#### 7.1.2.1 Ajustes a los puntos y frecuencias de muestreo para análisis de calidad de agua.

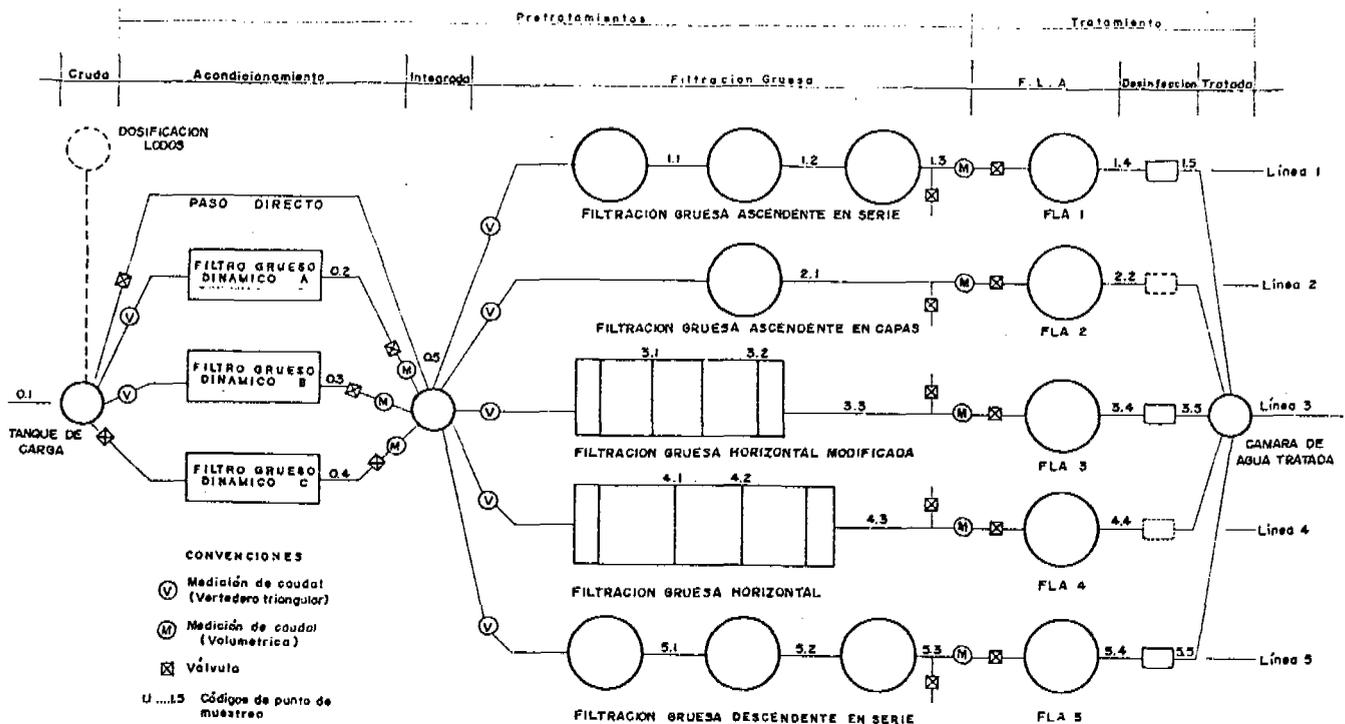
Se consideraron los mismos puntos de muestreo del periodo anterior, excluyendo los puntos intermedios del FGH por presentar dificultad para la toma de las muestras. La identificación de esos puntos de muestreo se presentan en la Figura 7.3.

Respecto al periodo anterior, también se presentaron algunos cambios referente a los parámetros y las frecuencias de muestreo (Ver Tabla 7.4). Así, se aumentó la frecuencia de parámetros como turbiedad, sólidos suspendidos y coliformes fecales por considerar que eran de gran importancia para el seguimiento de la calidad del agua de los sistemas.

Se disminuyó la frecuencia de parámetros como oxígeno disuelto, alcalinidad total, dureza total y pH, por no presentar variabilidad en el Periodo I.

Parámetros como filtrabilidad y sólidos sedimentables se realizaron esporádicamente después del periodo II, cuando la calidad de agua permitía su realización.

Análisis como hierro y manganeso se incluyeron en la investigación por estar presentes en el afluente y tener incidencia en los sistemas evaluados. Igualmente sólidos totales y volátiles fueron incluidos para completar la información existente sobre residuos sólidos y contenido de materia orgánica respectivamente.



**FIGURA 7.3** Diagrama de flujo del sistema de Unidades de Prueba de la Fase I del proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.

### 7.1.2.2 Ajustes al diseño

Con el fin de superar las limitaciones encontradas en el comportamiento de las unidades de prueba en el Periodo I y procurando demostrar en el marco del presente Proyecto, el potencial de las tecnologías de pretratamiento en medios gruesos, se modificaron a la vez criterios de operación de las unidades de prueba y especificaciones de los lechos de grava según se indica en la Tabla 7.5 que en general implican una reducción en tamaños de grava, aumento de longitudes de lecho filtrante y variación de las velocidades de filtración, iniciando desde un valor más bajo, 0.30 m/h, según las recomendaciones de las investigaciones preliminares realizadas en Perú (Ver aparte 2).

**TABLA 7.4**

**Frecuencia y puntos de muestreo para análisis de calidad de agua. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.**

PUNTO DE MUESTREO	01	03	06	1.1	1.2	1.3	1.4	Cantidad
						2.1	2.2	total de
PARAMETRO						3.3	3.4	pruebas
		04				4.3	4.4	y
	05		5.1	5.2	5.3	5.4		análisis
-Color real (UPC)	4d	d	2s	2s	2s	2s	2s	4d/44s
-Turbiedad (UNT)	24d	d	3d	3d	3d	3d	3d	90d
-Sólidos sedimentales (ml/h)	q	q	q	q		(2.1-q)		10q
-Sólidos suspendidos (mg/l)	d	2s	2s	2s	2s	2s	2s	1d/44s
-Sólidos volátiles (mg/l)	m	m	m	m	m	m	m	23m
-Sólidos totales (mg/l)	m	m	m	m	m	m	m	23m
-Temperatura (°C)	4d							4d
-Pérdida de carga hidráulica (cm)		3s		3s	3s	3s	3s	57s
-Pérdida de carga parcial (cm)		(02-s)		s	s	s	s	19s
-Caudal (l/s)	d			d			d	10d
-pH (Unidades)	q		q			q	q	12q
-Alcal. total (mg/l Ca CO <sub>3</sub> )	m		m			m	m	12m
-Dureza total (mg/l Ca CO <sub>3</sub> )	m		s			s	s	12m
-Oxígeno disuelto (mg/l)	q		d			d	d	12q
-Hierro y Manganeso total (mg/l)	m	m	m	m	m	m	m	23m
-Coliformes fecales (UFC/100 ml)	2s	2s	2s	2s	2s	2s	2s	46s
-Estreptococos fecales (UFC/100 ml)	q	q	q	q	q	q	q	23q

d = diaria    s = semanal    q = quincenal    m = mensual

Nota: En el periodo III se cumplió la misma frecuencia excepto para el análisis Filtrabilidad, que fué suspendido. Los estreptococos fecales fueron reducidos a 1 vez al mes.

TABLA 7.5 Parámetros de diseño y Especificaciones de los Lechos Filtrantes de las Plantas Piloto del Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III<sup>(a)</sup>, IV<sup>(a)</sup>.

PARAMETRO DE DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DE LECHOS FILTRANTES	LINEAS DE PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO																
	ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO			ETAPA DE PRETRATAMIENTO EN FILTRACION GRUESA												ETAPA DE FILTRACION LENTA	
	FGDiA	FGDiB	FGDiC	FGAS			FGAC	FGHM			FGH			FGDS			FLA
				1	2	3		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
. Area (m <sup>2</sup> )	1.98	2.00	0.75	3.14	3.14	3.14	3.14	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	3.14	3.14	3.14	3.14
. Velocidad en dirección del flujo Captado (m/h)																	
- Periodo II	1.0	1.5	2.0	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.10
- Periodo III	2.0	1.5	3.0	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.10
- Periodo IV	2.0	1.5	3.0	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.15
. Longitud de los Lechos Filtrantes (m)																	
Grava 19 - 25 mm.				0.30	0.15		0.30							0.30	0.15		
Grava 13 - 19 mm.	0.20	0.20	0.20	1.25	0.15	0.10	0.30	2.06			3.27			1.25	0.15	0.1	
Grava 6 - 13 mm.	0.20	0.20	0.20		1.25	0.10	0.30		1.14	0.10		2.32			1.25	0.1	
Grava 3 - 6 mm.	0.20	0.20	0.20			0.675	0.30			0.60			1.00			0.675	0.15
Grava 1.6 - 3 mm.						0.675	0.35			0.55			0.55			0.675	
Arena Filtro Lenta (Cu=1.5 D <sub>10</sub> =0.20 mm) <sup>a</sup>																	
Lecho filtrante útil	0.60	0.60	0.60	1.55	1.40	1.45	1.55	2.06	1.14	1.15	3.27	2.32	1.55	1.55	1.40	1.45	1.00

<sup>a</sup> Cu: Coeficiente de desuniformidad: D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub>

D<sub>10</sub>: Diámetro efectivo (mm)

(a) .Durante estos periodos se conserva la longitud de lechos filtrantes del Periodo II

### 7.1.2.3 Criterios de mantenimiento.

Los criterios tenidos en cuenta para el mantenimiento de las unidades de prueba en estos periodos se mantuvieron constantes a los del Periodo I, excepto para los filtros gruesos en los cuales se disminuyó la frecuencia de lavado de quincenal a mensual, siempre y cuando la pérdida de energía hidráulica en las unidades de flujo vertical no superara los 0.30 m de columna de agua; para la alternativa de FGHM, el límite de pérdida de energía fue de 0.10 m. A la alternativa de FGH no se le hizo limpieza hidráulica con descargas de fondo. (Ver Tabla 7.6).

**TABLA 7.6 Criterios de Mantenimiento de las unidades de Prueba del Proyecto PRETRATAMIENTO. Periodo II, III y IV.**

Unidad	Criterio	Sistema de Lavado
FGDi	Reducción de Caudal	Lavado superficial de la primera capa de grava. Descarga de fondo (# variable) hasta mejora en la calidad de agua de lavado o recuperación de caudal de diseño.
Filtros Gruesos	Cada 30 días o desmejoramiento en la calidad de agua en el efluente o pérdida de carga máxima (30 cm)	Lavado de la capa superficial de grava 1. Descarga de fondo hasta mejora en la calidad del agua de lavado. 3 impactos y descarga de fondo a 2 m bajo nivel inferior de unidad.
Filtros Lentos	Pérdida de carga máxima 0.80 m	Rapado de la capa superficial de arena.

## 7.2 PROYECTOS A ESCALA REAL

De los sistemas de filtración lenta en arena construidos en el Valle del Cauca, se seleccionaron siete (7) para seguimiento en el marco del presente Proyecto (Ver Figura 7.4). Algunas características técnicas de los sistemas seleccionados para su evaluación se presentan en la Tabla 7.7.

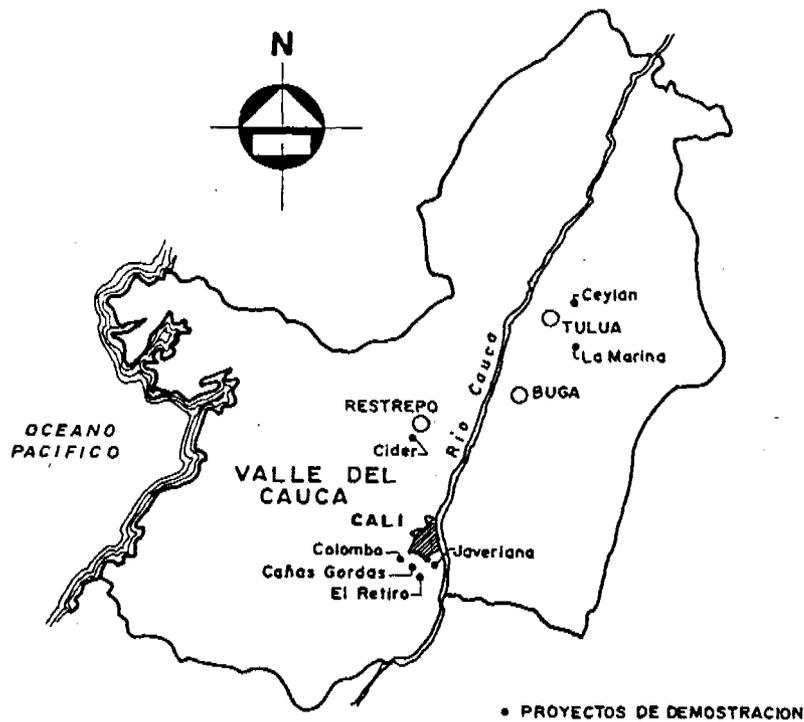
### 7.2.1 Puntos y frecuencias de muestreo para análisis de calidad de agua.

Los puntos de muestreo se consideraron en el agua cruda y a la salida de los sistemas evaluados. A manera de ejemplo se presenta, el esquema y los puntos de muestreo de una planta a escala real se ilustra en la Figura 7.5 para el caso de la planta del Colegio Colombo Británico. En el anexo 2 se presentan los de las otras plantas.

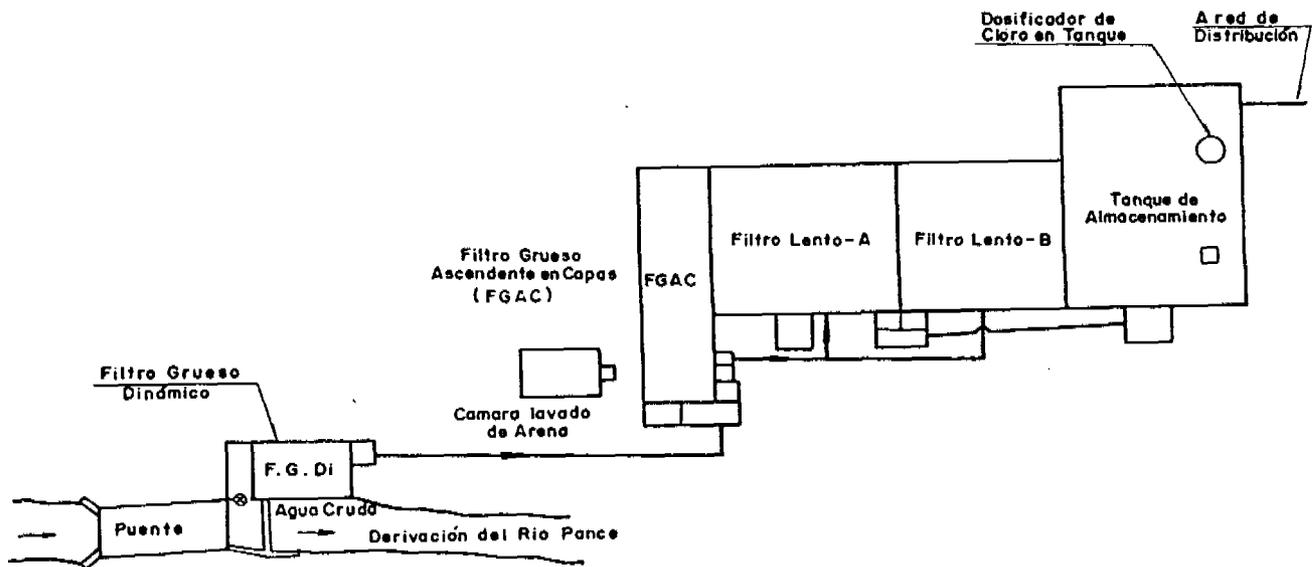
TABLA 7.7

Información técnica sobre los sistemas a Escala Real. (Fuente: CINARA, 1992).

PLANTA DE TRATAMIENTO	FILTROS GRUESOS					FILTRO LENTO EN ARENA
	CAUDAL (l/s)	TIPO	LECHO DE GRAVA			VELOCIDAD
			LONGITUD (m)	RANGO (mm)	VELOCIDAD (m/h)	FILTRACION (m/h)
CEYLAN	9.4	FGAS	2.0	25-3	0.70	0.14
EL RETIRO	8.8	FGDi	0.3	4-25	1.5	
		FGAC	0.7	25-3	0.70	0.15
COLOMBO	0.7	FGDi	0.6	6-25	1.5	
		FGAC	1.2	25-4	0.60	0.11
RESTREPO	0.7	HRF	7.0	5-16	0.80	0.15
JAVERIANA	1.5	FGDi	0.6	4-25	0.75	
		HRF	4.0	16-3	1.00	0.08
LA MARINA	7.9	FGAS	2.0	25-3	0.90	0.16
CAÑAS GORDAS	8.6	FGDi	0.6	25-7	10.20	
		FGAS	1.8	25-3	0.70	0.16



**FIGURA 7.4** Localización en el Valle del Cauca de los siete sistemas de abastecimiento que incluyen tratamiento con unidades de FLA y pretratamiento con diferentes alternativas de filtración gruesa.



**FIGURA 7.5** Planta de Potabilización con Filtración Lenta en Arena, Filtración Gruesa Ascendente en Capas y Filtro Grueso Dinámico. Colegio Colombo Británico. Cali.

Para tener un rango más amplio del comportamiento de la tecnología con mejores calidades de agua, se consideró necesario evaluar los mismos parámetros de la planta piloto utilizando frecuencias menores, debido a los costos que implica el desplazamiento a dichos proyectos.

Los parámetros y frecuencias utilizados en las plantas se presentan en las Tablas 7.8 y 7.9. Una vez se obtuvo información suficiente y debido a la poca variación que los datos presentaban, a partir de julio de 1991, se disminuyeron las frecuencias de muestreo en las plantas del sur de Cali, de dos a una visita semanal, mientras que en las del norte del Valle, se redujo el muestreo a una vez al mes.

**TABLA 7.8 Frecuencia y puntos de muestreo para análisis de calidad de agua. Plantas a escala real. Sur de Cali. Proyecto PRETRATAMIENTOS. (Octubre 1990 - Julio 1992).**

Puntos muestreo	Parámetro	Cruda	FGDi SS	Puntos intermedios de pretrat *		Salida Pretra **	FLA	Desinfección
Turbiedad (UNT)		2s	2s	2s	2s	2s	2s	25
Color real (UPC)		2s	2s	2s	2s	2s	2s	25
Sólidos suspendidos (mg/l)		s	s	s	s	s	s	-
Sólidos totales y volátiles (mg/l)		m	m	m	m	m	m	-
Temperatura (°C)		q	-	-	-	-	-	q
pH (Unidades)		q	-	-	-	q	q	q
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		m	-	m	m	m	m	-
Dureza total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		m	-	m	m	m	m	-
Oxígeno disuelto (mg/l)		q	q	q	-	q	q	-
DQO (mg/l)		m	-	m	m	m	m	-
Hierro y manganeso (UFC/100 ml)		m	-	m	m	m	m	-
Coliformes fecales (UFC/100 ml)		2s	2s	2s	2s	2s	2s	s
Estreptococos fecales (UFC/100 ml)		q	q	q	q	q	q	q
Pérdida de carga (cm)		-	2s	2s	2s	2s	2s	-
Caudal (l/s)		-	2s	2s	2s	2s	2s	-

s = semanal ; q = quincenal ; m = mensual  
El cloro residual se midió 2s en la red o el tanque.  
\* Análisis muestra integrada unidades en paralelo  
\*\* Análisis separado a unidades en paralelo

Nota: Se consideran puntos intermedios los siguientes:  
Planta Universidad Javeriana: FGH1 y FGH2  
Plantas El Retiro y Colombo: no tienen  
Planta Cañas Gordas: FGAS1

**TABLA 7.9**

**Frecuencia y puntos de muestreo para análisis de calidad de agua. Plantas a escala real. Norte del Valle del Cauca. Proyecto PRETRATAMIENTOS.**

Puntos de muestreo Parámetro	Cruda	Puntos intermedios de pretratamiento *		Salida pretrat**	FLA	Desinfección
Turbiedad (UNT)	2s	2s	2s	2s	2s	2s
Color real (UPC)	2s	2s	2s	2s	2s	2s
Sólidos suspendidos (mg/l)	s	s	s	s	s	-
Sólidos totales y volátiles (mg/l)	m	m	m	m	m	-
Temperatura (°C)	q	-	-	-	-	q
pH (Unidades)	q	-	-	q	q	q
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	m	-	-	m	m	-
Dureza total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	m	-	-	m	m	-
Oxígeno disuelto (mg/l)	q	q		q	q	-
DQO (mg/l)	m	m	m	m	m	-
Hierro y manganeso (mg/l)	m	-	-	m	m	-
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	2s	2s	2s	2s	2s	s
Estreptococos fecales (UFC/100 ml)	q	q	q	q	q	q
Cloro residual (mg/l)	-	-	-	-	-	2s
Pérdida de carga (cm)	-	2s		2s	2s	-
Caudal (l/s)	-	2s		-	2s	-

s = semanal

m = mensual

q = quincenal

\* Análisis muestra integrada muestras en paralelo

\*\* Análisis separado a unidades en paralelo

Nota: Se consideran puntos intermedios los siguientes:

Planta la Marina FGAS1 y FGAS2

Planta Cider Restrepo FGH1 y FGH2

Planta Ceylán FGAS1

## 8 PROCEDIMIENTOS Y METODOS ANALITICOS

### 8.1 TOMA DE MUESTRAS

Las muestras para los análisis fisico-químicos se tomaron en recipientes plásticos de 1000 ml. Para las determinaciones de oxígeno disuelto se usaron botellas de winkler de 300 ml. Para los análisis de hierro, manganeso y DQO se utilizaron recipientes plásticos de 250 ml y se preservaron de acuerdo a las recomendaciones del Standard Methods, 1989.

Las muestras de las plantas piloto fueron llevadas al laboratorio fisicoquímico de la Estación para ser analizadas inmediatamente en los análisis que así lo requerían.

Las muestras para análisis fisicoquímicos tomadas en los sistemas a escala real fueron analizadas después de 4 y 10 horas de muestreo en las plantas del Sur y del Norte respectivamente. Oxígeno disuelto, pH, temperatura y cloro residual se analizaron en el sitio de muestreo.

Para la toma de muestras para análisis bacteriológicos de la planta piloto, se utilizaron frascos de vidrio con tapa rosca, previamente esterilizados y de 250 ml de capacidad, las muestras fueron analizadas inmediatamente en el laboratorio de Microbiología de la Estación.

Los análisis bacteriológicos en los sistemas a escala real se hicieron con el equipo portátil. El equipo DelAgua, que incluye una incubadora con temperatura regulada a 44.5 °C, fue utilizada para evaluar el nivel de coliformes fecales. El equipo Millipore, con una incubadora regulada a 37°C fue utilizada para evaluar el nivel de estreptococos fecales. Las muestras se procesaron inmediatamente en el sitio.

### 8.2 METODOS ANALITICOS

A continuación se resumen los métodos analíticos para algunos parámetros utilizados en la discusión de resultados. Adicionalmente, se listan todos los parámetros de calidad de agua medidos en el Proyecto (Ver Tabla 8.1).

**Turbiedad (UNT).** Se midió por el método nefelométrico, utilizando un turbidímetro HACH modelo 2100A, (Standard Methods, 1989). El equipo fue calibrado con estándares primarios de formazina. El turbidímetro Hach fue calibrado semanalmente con estándares primarios de formazina de 100, 10 y 1 UNT para verificar la concentración de los estándares secundarios. Igualmente el equipo fue ajustado para los diferentes rangos (100, 10, 1 UNT) de acuerdo a las recomendaciones del manual.

**TABLA 8.1 Parámetros de calidad de agua medidos en el Proyecto**

Parámetro	Referencia para los métodos analíticos (1)
Turbiedad (UNT)	Parte 2130 B
Color real (UPC)	Parte 2120
Sólidos suspendidos (mg/l)	Parte 2540 D (3)
Sólidos sedimentales (ml/l/h)	Parte 2540 F
Sólidos totales (mg/l)	Parte 2540 B
Sólidos volátiles (mg/l)	Parte 2540 G
Temperatura (°C)	Parte 2550 A
Determinación de los Sólidos almacenados en los lechos (mg/cm <sup>3</sup> )	(3)
Silt test (% ml/ml)	(4)
pH (unidades)	Parte 4500 A
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Parte 2320 B
Dureza total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Parte 2340 C
Oxígeno disuelto (mg/l)	Parte 4500 C
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	Parte 3220 B
Hierro total (mg/l Fe)	Parte 3500 D
Manganeso total (mg/l)	Parte 3500 D
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	Parte 9222 A
Estreptococos fecales (UFC/100 ml)	Parte 9230 A
Análisis microbiológico en lechos de arena	(3)
Recuento standard en placa	Parte 9215 B
Recuento de Plancton	Parte 10200 F

(1) Standard Methods, 1989.

(2) Wegelin, M. 1986.

(3) Modificaciones según procedimientos descritos en los anexos 2 y 6.

(4) Wheeler, 1989. Ver además, Anexo 7.

Se determinó por el método espectrofotométrico modificado por el laboratorio para el equipo Shimadzu a 455 nm. (Standard Methods, 1989) previa centrifugación de la muestra a 3000 rpm durante 15 min. Las medidas tomadas en el equipo fueron chequeadas semanalmente con patrones de platino cobalto, preparados a partir de una solución standard de 4000 UPC.

**Sólidos Suspendidos (mg/l).** Se midió por gravimetría, (Standard Methods, 1989), utilizando filtro whatman de fibra de vidrio 934 AH de 1.2  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro. Para turbiedades bajas (<20 UNT) se utilizó el método fotométrico con el espectrofotómetro Shimadzu UV-120-01 a 810 nm, para ello se hicieron correlaciones entre los dos métodos para varias muestras. El equipo fue calibrado con dos valores promedio de 4 análisis de sólidos, medidos por gravimetría. En el anexo 4 se presentan estas correlaciones.

**Filtrabilidad (ml/3 min):** Se determinó en un vaso equipado con una membrana metálica a través del cual se drena una muestra (550 ml) cuyo volumen se mide a los 3 minutos. Se utilizó papel de filtro S y S de 1  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro (Wegelin, 1986).

**Coliformes Fecales (UFC/100 ml).** La determinación se hizo mediante la técnica de filtración por membrana utilizando filtros Gelman de 0.45 micras de porosidad, empleando el caldo Lauryl Sulfato membrana de Oxoid con períodos de incubación de 2h/35°C más 16h/44.5°C. (Oxoid, 1989).

En la evaluación de la Planta Piloto se sembraron los siguientes volúmenes, cada uno por duplicado:

Agua cruda	1 y 0.1 ml
Agua acondicionada	1 y 0.1 ml
Agua prefiltrada	60 y 10 ml
Agua filtrada	100 ml

Los procedimientos y volúmenes de siembra fueron los recomendados por el Standard Methods (1989) y Vargas C. (1983).

Para los análisis bacteriológicos de los sistemas a escala real, se siguió igual procedimiento que en la Planta Piloto, pero variando los volúmenes así:

Agua cruda	10 y 1 ml
Agua acondicionada	50 y 10 ml
Agua prefiltrada	100 y 50 ml
Agua filtrada	100 ml
Agua desinfectada	100 ml

La desinfección en todos los sistemas a escala real se realizó con cloro, por lo tanto las muestras fueron decloradas con tiosulfato, antes de la siembra.

**Sólidos almacenados en lechos de arena y grava ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ):** Se tomaron muestras a diferentes profundidades del lecho de los filtros gruesos y filtros lentos en envases plásticos de 1 l y 250 ml respectivamente, se analizaron las muestras para sólidos totales y sólidos suspendidos. (Standard Methods, 1989). Este análisis se hizo al finalizar el Período I. (Ver anexo 6).

**Análisis microbiológicos en lechos de arena:** Al finalizar el Período I de la investigación se hicieron análisis de recuento standard en placa y análisis cualitativo del plancton a diferentes profundidades de los lechos de arena en los FLA, (ver Anexo 6).

**Caudal (l/s):** El caudal afluente a los acondicionadores se midió mediante un vertedero triangular de 30 ° el cual fue calibrado volumétricamente para diferentes caudales. El caudal filtrado de los acondicionadores y de los filtros lentos de arena se midió volumétricamente en recipientes calibrados en mililitros. El caudal de las unidades de pretratamiento se midió en vertederos triangulares de 30 ° calibrados volumétricamente.

**Pérdida de carga hidráulica (cm):** Se midió por la diferencia de niveles de agua entre la entrada y salida de cada unidad para lo cual se implementaron piezómetros de vidrio. A partir del Período II, se midió la pérdida de carga entre las diferentes capas o lechos filtrantes de cada unidad utilizando piezómetros instalados en cada capa.

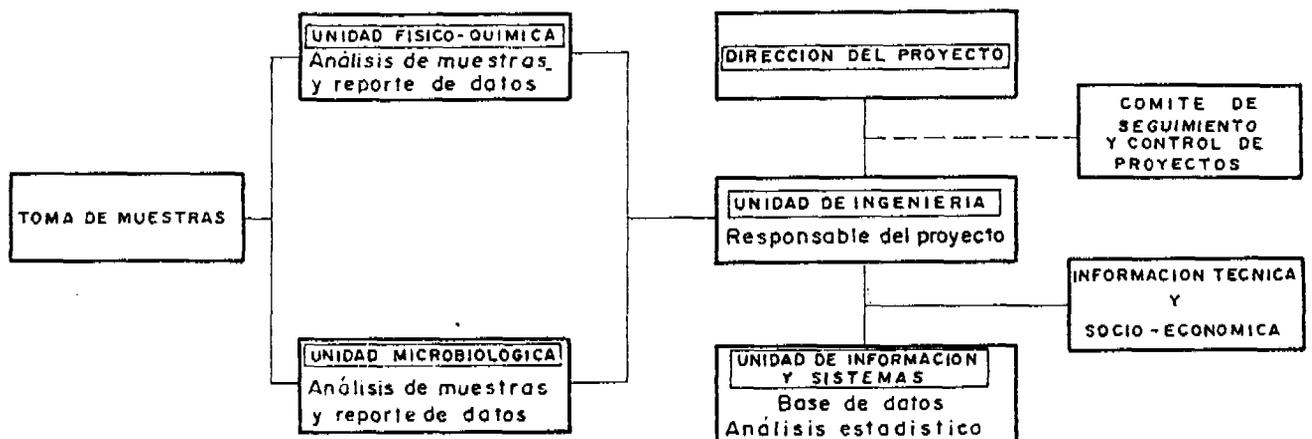
**Silt test (% ml/ml):** Se analizaron muestras tomadas antes y después del raspado de los filtros lentos de la planta piloto. El muestreo se hizo en envases plásticos de 250 ml (Wheler 1989).

## 9 MANEJO DE LA INFORMACIÓN

### 9.1 SISTEMAS DE INFORMACION

Para el Proyecto se diseñó un sistema de información el cual permite recopilar, organizar, sistematizar y procesar los datos de una manera ágil, confiable y segura.

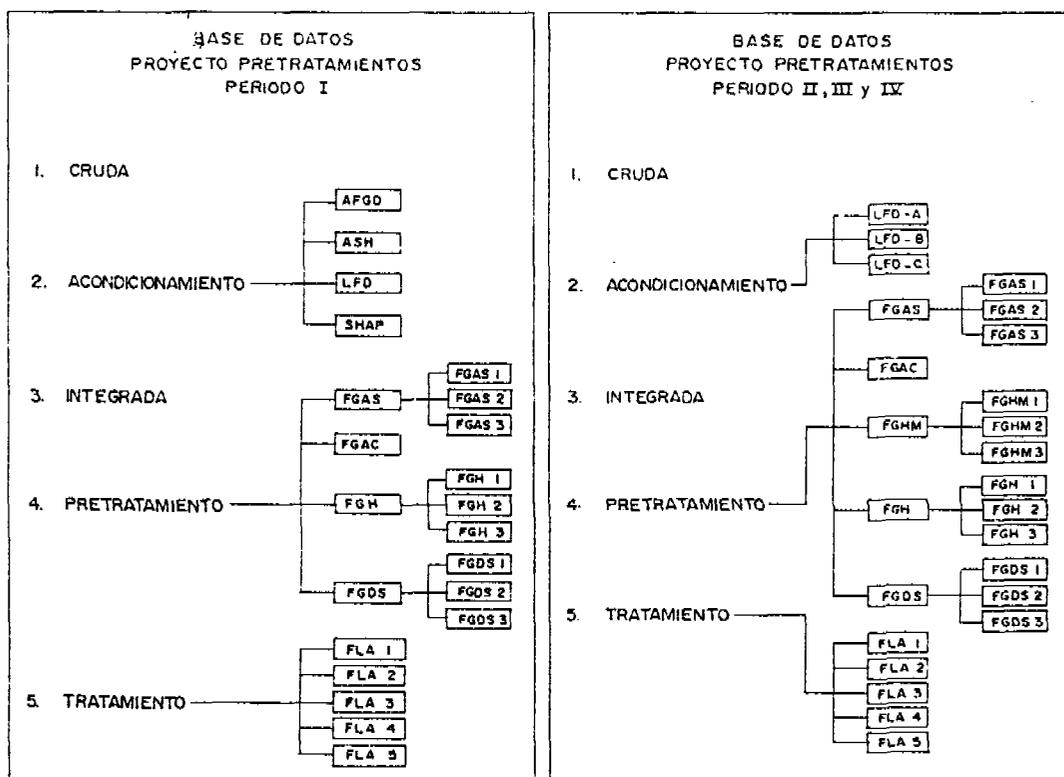
El manejo de la información se desarrolló con base en el esquema de acción que se ilustra en la Figura 9.1, el cual identifica el seguimiento de la información desde la toma de la muestra hasta el reporte y análisis de los resultados.



**FIGURA 9.1** Flujo de información Proyecto Integrado de Investigación y Demostración de Métodos de Pretratamiento para Sistemas de Abastecimiento de Agua.

El Sistema de información del Proyecto se dividió en varias bases de datos programadas en la hoja electrónica Symphony. Cada base de datos es una combinación de archivos que se utilizan conjuntamente de manera integrada y coordinada permitiendo recolectar un conjunto de datos mutuamente relacionados.

El esquema diseñado de la base de datos, para la planta piloto, permite controlar y manipular la información almacenada en diferentes archivos de manera fácil y rápida (Ver Figura 9.2). La evaluación realizada en las plantas de demostración se ha almacenado también en una base de datos. Información adicional sobre la organización y las características de las bases de datos se presentan en el Anexo 4.



**FIGURA 9.2 Esquema General de la Base de Datos. Proyecto PRETRATAMIENTOS.**

## 9.2 MODELO DE DISEÑO DE EXPERIMENTO

El modelo de diseño de experimento, es una herramienta estadística, la cual permite comparar de una manera confiable diferentes niveles de un factor de tratamiento bajo las mismas condiciones.

En el presente estudio el factor es el sistema de pretratamiento con cinco niveles, FGAS, FGAC, FGHM, FGH y FGDS.

La hipótesis a probar es la siguiente

- Existen diferencias significativas en los promedios de calidad de agua en las salidas de los cinco sistemas de pretratamiento para determinados rangos del agua cruda.

Para probar el nivel de confiabilidad de la hipótesis planteada se definió el modelo de diseño de bloques al azar con un factor de tratamiento, debido a que existe un factor, el pretratamiento, y el bloque se define como un factor de control que permita calcular la variación que existe entre cada muestra analizada. El bloque es cada muestra a la cual se le hace seguimiento en los diferentes sistemas de pretratamiento.

La expresión matemática del modelo es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + P_i + B_j + \epsilon_{ij}$$

donde:

$Y_{ij}$  = Parámetro o variable de respuesta, en el cual se van a comparar los sistemas de pretratamiento.

$\mu$  = Promedio general en la variable de respuesta, sin considerar ningún pretratamiento.

$P_i$  = Efecto del i-ésimo sistema de pretratamiento

$P_1$ : FGAS

$P_2$ : FGAC

$P_3$ : FGHM

$P_4$ : FGH

$P_5$ : FGDS

$B_j$  = Efecto del j-ésimo sistema de pretratamiento

$\epsilon_{ij}$  = Término de error, debido a factores no controlados en el experimento.

La prueba de hipótesis se realiza con la técnica del análisis de varianza (ANOVA). El análisis de varianza es un proceso aritmético que permite descomponer la variación total en componentes asociadas con la variación de los factores del modelo.

Si se acepta la hipótesis planteada, o sea, si existen diferencias entre los promedios de los sistemas de pretratamiento es necesario realizar una prueba post-ANOVA de jerarquización de Tukey.

Con la prueba de Tukey se detecta la diferencia mínima significativa (DMS) en los cuales los sistemas de pretratamientos son iguales; además de realizar la jerarquización. La DMS es un valor calculado con la variación total de la variable de respuesta asociada a una distribución de probabilidad. Este valor permite determinar la igualdad de los sistemas de pretratamiento. Información adicional se presenta en el Anexo 4.

## 10 PLAN GENERAL DE ACTIVIDADES

En la Tabla 10.1 se presenta el cronograma general de actividades ajustado según el desarrollo general del Proyecto. Las primeras seis actividades están relacionadas con el diseño, construcción y puesta en marcha del sistema de las unidades de prueba en la Estación. La actividad 5 constituye el Período I del Proyecto en la cual las diferentes alternativas de filtración quedan especificadas como se indicó en el capítulo 8, operando con una velocidad de 0.6 m/h y las unidades de FLA con 0.15 m/h. La actividad 7 constituye el Período II del Proyecto en la Estación de Puerto Mallarino, en la cual las unidades de pretratamiento con nuevas especificaciones (aparte 7.1.2), fueron operadas con velocidades de 0.30 m/h y las unidades de FLA con 0.10 m/h procurando de esta manera superar las limitaciones encontradas en el comportamiento de las unidades en el Período I.

Las actividades 7, 10 y 12 constituyen la evaluación de los períodos II, III y IV del Proyecto. Simultáneamente con estos Períodos se estudian los Filtros Gruesos Dinámicos como unidades de acondicionamiento previo.

La actividad 9 comprende la construcción y evaluación de unidades a escala real de Filtros Gruesos Dinámicos y de Filtros Gruesos Horizontales en el marco del Convenio IRCWD, International Reference Centre for Waste Disposal - Universidad del Valle - CINARA. Esta investigación se continua ahora en el marco del presente Proyecto dentro de las actividades 10 y 12 (Períodos III y IV) con las unidades de prueba en la Estación de CINARA en Puerto Mallarino. Además, se complementó con la evaluación del comportamiento de 7 proyectos construidos en la zona de ladera del valle geográfico del río Cauca.

La actividad 11 corresponde al Seminario Internacional en el cual se presentaron resultados del Proyecto y se intercambiaron opiniones con otros grupos de trabajo. Este Seminario realizado en la ciudad de Cali entre el 4 y el 7 de Noviembre de 1991 permitió presentar y discutir los desarrollos del Proyecto con el grupo de expositores provenientes de Holanda, Suiza, Brasil, Argentina y Colombia, además de divulgarse la experiencia entre los 150 profesionales asistentes de Colombia y otros países latinoamericanos.

Los participantes en este evento tuvieron además la oportunidad de visitar proyectos a escala real y de participar en los actos de inauguración de la segunda fase de la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de CINARA en Puerto Mallarino.



## 11 PRESENTACION Y DISCUSION ESPECIFICA DE RESULTADOS

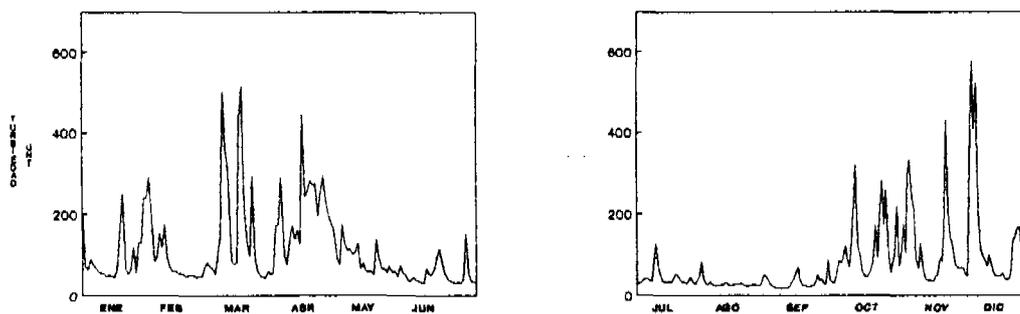
### 11.1 PLANTAS PILOTO

#### 11.1.1 Agua cruda

Durante 1990 el río Cauca presentó variaciones en la calidad del agua, influenciadas por épocas secas y lluviosas, observándose dos periodos en el año donde la turbiedad es baja, desde enero a mediados de marzo y, desde junio a septiembre, siendo este último el de más bajas turbiedad correspondiendo a la época seca. Por el contrario, en las dos épocas lluviosas se incrementaron los valores de turbiedad, medidos en los meses de marzo a mayo y de octubre a diciembre. Este comportamiento ha sido tradicional en la región del Valle del Cauca (Ver Figura 11.1), y obedece a la influencia de la convergencia intertropical.

Estas características del río permiten una ventaja en las unidades piloto, ya que al considerar periodos de evaluación de seis meses, se incluyen como mínimo una época seca y una época de lluvia, lo que permite sustentar los resultados en un amplio rango de calidad de agua.

La turbiedad del río Cauca se mantuvo con promedios entre 50 UNT y 100 UNT, durante los diferentes periodos de evaluación presentándose valores mínimos que alcanzaron las 15 UNT y valores máximos alrededor de 1300 UNT.



**FIGURA 11.1** Promedios diarios de turbiedad en el río Cauca. Enero a Diciembre de 1990. Proyecto PRETRATAMIENTOS.

En sólidos suspendidos, los promedios presentaron valores que oscilaron entre 61 y 187 mg/l. El color real estuvo entre 35 y 73 UPC y coliformes fecales entre 30000 a 148000 UFC/100 ml mostrando una amplia variabilidad durante los diferentes periodos de evaluación.

En el río Cauca se observaron concentraciones promedio de materia orgánica medidas indirectamente por DQO pro debajo de 18 mg/l. mg/l. Parámetros como hierro total y manganeso, presentaron valores promedio durante los periodos de evaluación entre 3.5 y 4.6 mg/l y entre 0.5 y 0.9 mg/l respectivamente.

Información adicional sobre los resultados encontrados en la calidad del agua cruda durante los periodos de investigación, se presenta en los apartes siguientes conjuntamente con la información de las unidades de acondicionamiento.

Esta fuente entonces, es muy contaminada y con valores elevados y de gran variabilidad; por lo cual, no se recomienda para ser tratada mediante filtración lenta en arena (Spencer et al, 1991; Cleasby, 1991; Di Bernardo, 1991). Sin embargo, para los propósitos del Proyecto, esta calidad es muy útil para probar la tecnología bajo condiciones exigentes.

Ocasionalmente, el río Cauca presentó variaciones fuertes y bruscas de calidad como se observa en la Figura 11.2. Este comportamiento aunque es inesperado para un río de valle, elevó en menos de 5 horas los sólidos suspendidos de 150 a 3150 mg/l, la turbiedad de 100 a 1600 UNT y el color real de 70 a 900 UPC. El enfrentar este tipo de variaciones en los sistemas de tratamiento, se convierte en otro problema a resolver, especialmente en aquellos donde el tiempo de residencia es pequeño, como por ejemplo en los sistemas de filtración directa y en las plantas compactas. En la presente investigación, no se hizo énfasis en la evaluación de este tipo problemas, sin embargo se permitió el ingreso de estas calidades a las unidades en evaluación.

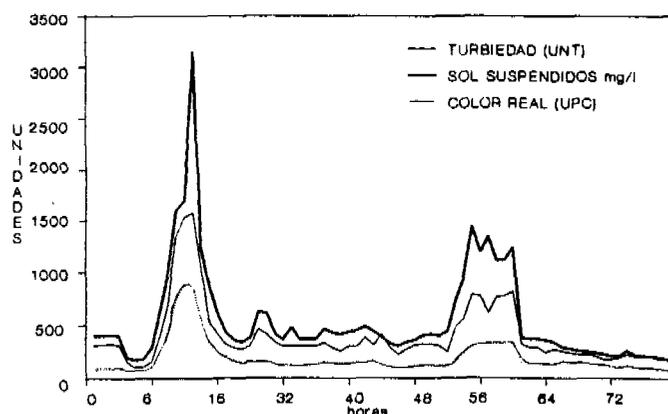


FIGURA 11.2

Caracterización horaria del agua cruda. Río Cauca. Marzo 26, 27 y 28 de 1990. Proyecto PRETRATAMIENTOS

## 11.1.2 Periodo I

### 11.1.2.1 Comportamiento de los acondicionadores

Como se indicó en el aparte 7, durante el periodo I se evaluaron las siguientes alternativas de acondicionamiento: Acondicionamiento por Sedimentación Simple (ASH), Acondicionamiento por Filtración Gruesa Descendente (AFGD), Filtración Gruesa Dinámica (FGDi) y Sedimentación Horizontal Acelerada de Placas Paralelas (SHAP). En la Figura 11.3 y en la Tabla 11.1 se presenta información sobre los valores promedio en agua cruda y en los efluentes de cada una de las anteriores unidades.

La Alternativa de FGDi presentó el mayor potencial para la remoción de los parámetros considerados, particularmente en lo que a remoción de sólidos suspendidos concierne. Este potencial podría aprovecharse ventajosamente en un sistema de tratamiento en bloques, en armonía con el concepto de tratamiento integrado anunciado en el aparte 4.5.

La remoción de color real fue inferior del 6.9% para las alternativas de AFGD y FGDi y del 4.1% para el ASH y el SHAP, mostrando que estos sistemas son poco eficientes en la reducción de sustancias causantes de color, que son partículas disueltas asociadas a compuestos orgánicos como ácidos húmicos y fúlvicos. Los sistemas de acondicionamiento mostraron capacidad para la remoción bacteriológica, siendo el FGDi la mejor, con una remoción promedio del 56.9% y en las otra unidades, inferior al 32.9%. (Ver Tabla 11.3).

Con base en estos resultados, se escogió la alternativa de FGDi como la mejor opción de acondicionamiento, para ser optimizada en las siguientes etapas de estudio.

### 11.1.2.2 Comportamiento de las Líneas de Investigación.

La calidad del agua requerida en los filtros lentos para lograr efluentes adecuados para el consumo humano, según se reporta en la literatura (Tabla 2.3 del aparte 2), no deben presentar turbiedades mayores a 10 UNT por periodos prolongados de tiempo, aunque ocasionalmente puede tratar picos más altos (50 a 120 UNT), sin que ello implique mayores dificultades (Galvis et al, 1991). Valores por debajo de 5 mg/l en sólidos suspendidos (Wegelin, 1989) y de 500 UFC/100 ml en coliformes fecales (Lloyd et al, 1991) también son recomendados para el uso de la filtración lenta en arena.

El efluente de los sistemas de filtración gruesa evaluados durante este primer Periodo, produjo calidades de agua que no alcanzaron, en promedio, los valores anteriormente recomendados. Los resultados obtenidos en los parámetros evaluados en las líneas de tratamiento, se presentan en la Tabla 11.4 y en la Figura 11.4 se grafican los de turbiedad, color real, sólidos suspendidos

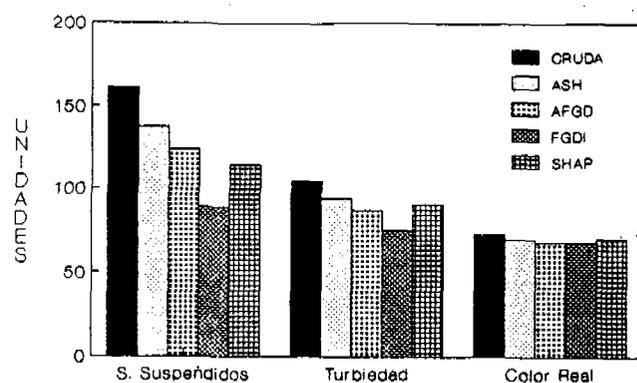


FIGURA 11.3 Promedio de Sólidos Suspendedos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.

TABLA 11.1 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	ACONDICIONADORES				
		CRUDA	ASH	AFGD	FGDi	SHAP
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	161	138	124	89	115
	Desviación	240	188	230	149	158
	Mínimo	19	17	6.0	6.0	13
	Máximo	1464	1136	1640	804	920
	No. Datos	147	108	115	117	118
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	105	95	88	76	91
	Desviación	150	141	141	121	140
	Mínimo	15	13	10	10	14
	Máximo	1300	1300	1250	1200	1300
	No. Datos	167	166	165	165	167
COLOR REAL (UPC)	Promedio	73	70	68	68	70
	Desviación	58	55	54	53	55
	Mínimo	18	17	16	16	17
	Máximo	400	410	400	375	395
	No. Datos	165	165	164	163	165
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	148575	99627	141949	64042	123568
	Desviación	168806	91691	174474	69942	118279
	Mínimo	11351	9109	8400	8273	727
	Máximo	720000	420000	810000	310000	520000
	No. Datos	28	28	27	27	27
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100mL)	Promedio	13780	19736	11061	7156	7069
	Desviación	17153	45561	24776	12138	5023
	Mínimo	100	1545	100	91	909
	Máximo	70000	230000	130000	60000	18000
	No. Datos	26	25	25	25	23

y coliformes fecales. En el Anexo 5 las estadísticas descriptivas de todos los parámetros evaluados en cada etapa de pretratamiento.

**TABLA 11.2** Remoción de turbiedad y sólidos suspendidos Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.

Sitio	Turbiedad		Sólidos Suspendidos	
	Promedio (UNT)	Remoción (%)	Promedio (mg/l)	Remoción (%)
Cruda	105		161	
ASH	95	9.7	138	30.5
AFGD	88	16.6	124	33.7
FGDi	76	28.0	89	48.4
SHAP	91	13.2	115	38.0

**TABLA 11.3** Remoción de color real y coliformes fecales. Unidades de acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.

Sitio	Color real		Coliformes fecales		
	Promedio (UPC)	Remoción (%)	Promedio (UFC/100ml)	Remoción (%)	# Log
Cruda	73		148575		
ASH	70	4.1	99627	32.9	0.17
AFGD	68	6.9	141949	4.5	0.02
FGDi	68	6.9	64042	56.9	0.37
SHAP	70	4.1	123568	16.8	0.08

TABLA 11.4 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período I.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2*		LINEA 3		LINEA 4	LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGH3	FLA3	FLA4	FGDS3	FLA5
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	161	107	5.7		55		4.3				6.2
	Desviación	240	167	8.9		66		5.4				8.0
	Mínimo	19	9.0	0.3		2.0		0.3				0.3
	Máximo	1464	1136	64		362		36				47
	No. Datos	147	140	113		43		110				115
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	106	92	28	10	77	17	24	11	14	29	9.7
	Desviación	151	142	31	11	77	12	26	11	12	32	9.0
	Mínimo	15	11	4.0	1.1	18	4.4	4.1	1.0	2.5	4.3	1.3
	Máximo	1300	1300	180	71	470	64	135	83	72	170	56
	No. Datos	163	163	162	163	88	83	160	160	94	157	154
COLOR REAL (UPC)	Promedio	73	70	50	27	82	35	49	27	32	53	27
	Desviación	58	55	35	23	56	19	34	18	17	37	19
	Mínimo	18	17	8	3	28	12	9	2	11	12	3
	Máximo	400	400	250	225	325	100	210	140	115	250	185
	No. Datos	165	164	163	164	90	85	162	160	96	159	155
COLIFORMES FECALES (UFC/100ML)	Promedio	136147	90020	2097	59	24286	213	2869	90	1044	3248	116
	Desviación	142208	62555	2362	145	38797	349	3290	379	1422	4272	324
	Mínimo	11351	6847	99	0	564	3	108	0	3	400	0
	Máximo	720000	380000	10455	873	174000	1290	12500	2432	5200	22000	1400
	No. Datos	41	41	40	37	20	24	40	40	19	39	39
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100ml)	Promedio	14059	11948	409	137	2468	36	575	148	99	406	32
	Desviación	19671	33999	1642	538	6018	103	1975	873	117	622	82
	Mínimo	100	727	0	0	0	0	9	0	0	0	0
	Máximo	73000	220000	10700	2700	31530	500	12800	5600	473	2818	391
	No. datos	38	40	41	38	26	22	41	40	21	41	40

\* El período de medición para estas unidades comprende Enero - Junio de 1990.

TABLA 11.4 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período I. (Continuación).

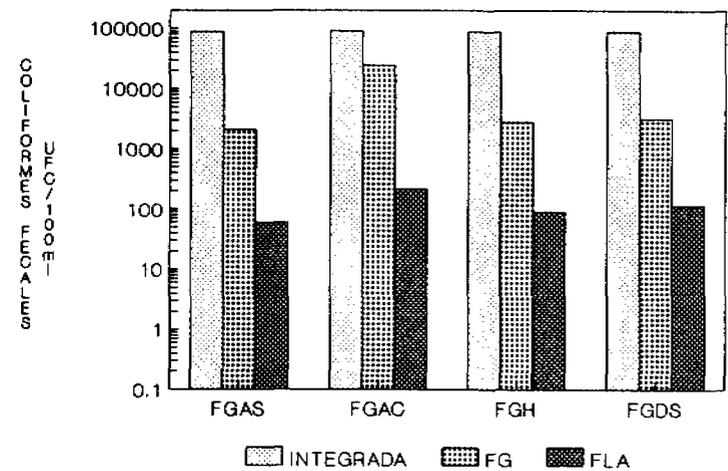
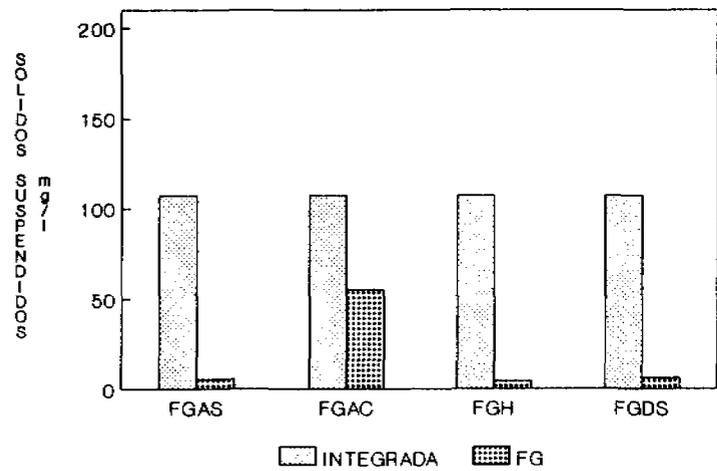
PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2*		LINEA 3		LINEA 4	LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGH3	FLA3	FLA4	FGDS3	FLA5
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	5.8	5.9	6.3	5.8	5.9	5.6	5.1	6.9	4.9	5.6	5.4
	Desviación	0.8	0.7	0.9	1.0	0.8	0.9	0.8	1.9	1.1	0.8	1.0
	Mínimo	2.5	2.8	2.0	3.5	2.8	3.3	2.6	1.9	1.3	1.6	2.4
	Máximo	8.7	8.0	10.4	10.0	8.4	8.0	9.0	11.8	7.1	9.6	8.1
	No. datos	142	164	163	156	93	104	162	156	95	157	155
DUREZA TOTAL (mg/L CaCO3)	Promedio	27.0	27.0	27.0	28.0	21.3	25.0	30.0	28.0	24.0	28.0	29.0
	Desviación	5.0	6.0	6.0	6.0	4.2	5.0	6.0	6.0	5.0	6.0	6.0
	Mínimo	16.0	14.0	14.0	14.0	15.0	16.0	20.0	9.0	18.0	18.0	18.0
	Máximo	33.0	38.0	37.0	35.0	29.0	34.0	38.0	38.0	33.0	36.0	37.0
	No. datos	31	35	34	35	19	21	34	35	20	34	32
ALCALINIDAD TOTAL (mg/L CaCO3)	Promedio	26.0	27.0	27.0	26.0	28.8	28.0	29.0	28.0	30.0	27.0	28.0
	Desviación	4.0	4.0	4.0	5.0	4.4	5.0	5.0	6.0	3.0	5.0	4.0
	Mínimo	18.0	19.0	20.0	12.0	24.0	15.0	21.0	17.0	24.0	18.0	21.0
	Máximo	36.0	35.0	36.0	36.0	36.0	38.0	45.0	43.0	36.0	38.0	39.0
	No. datos	31	35	35	35	19	21	34	34	20	34	32

\* El periodo de medición para estas unidades comprende Enero - Junio de 1990

TABLA 11.4 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período I. (Continuación).

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2*		LINEA 3		LINEA 4	LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGH3	FLA3	FLA4	FGDS3	FLA5
pH (unidades)	Mínimo	6.0	6.1	6.3	6.3	6.2	6.3	5.6	6.4	6.2	6.3	6.3
	Máximo	7.5	7.8	8.9	7.6	7.6	7.7	8.4	8.0	7.8	7.8	7.7
	No. datos	156	167	161	154	92	103	162	162	94	160	156
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	22.7	23.0	24.6	24.8	23.7	23.4	23.6	24.3	23.2	23.0	23.6
	Desviación	1.0	1.1	1.1	0.9	1.2	0.7	1.0	0.9	0.8	1.0	0.8
	Mínimo	20.0	20.0	21.0	23.0	19.0	22.0	21.5	22.0	22.0	20.0	22.0
	Máximo	25.0	25.5	28.0	27.0	26.0	25.0	26.0	26.2	25.0	26.0	26.0
	No. datos	100	273	263	93	161	46	269	100	44	267	100
D Q O (mg/L)	Promedio	25.4	18.2	<7.0		11.9		<7.3			<7.3	
	Desviación	11.4	4.7	2.2		1.4		2.4			2.0	
	Mínimo	15.0	11.8	<5.0		10.0		<5.0			<5.0	
	Máximo	49.0	25.5	10.7		13.5		11.0			11.6	
	No. datos	6	6	6		4		7			7	

\* El periodo de medición para estas unidades comprende Enero - Junio de 1990



71

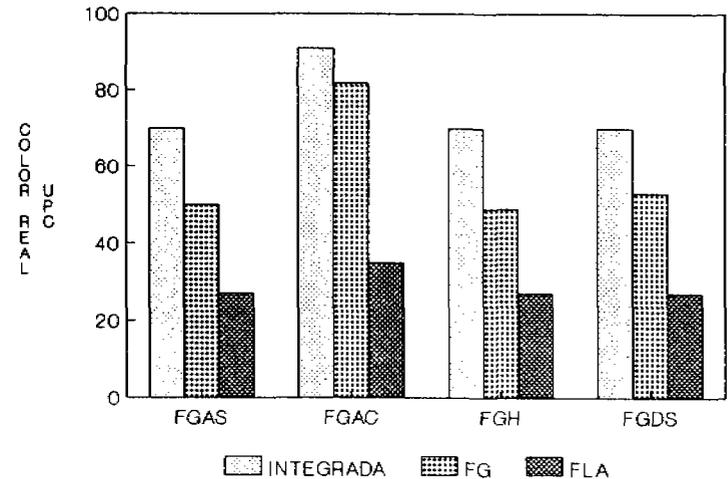
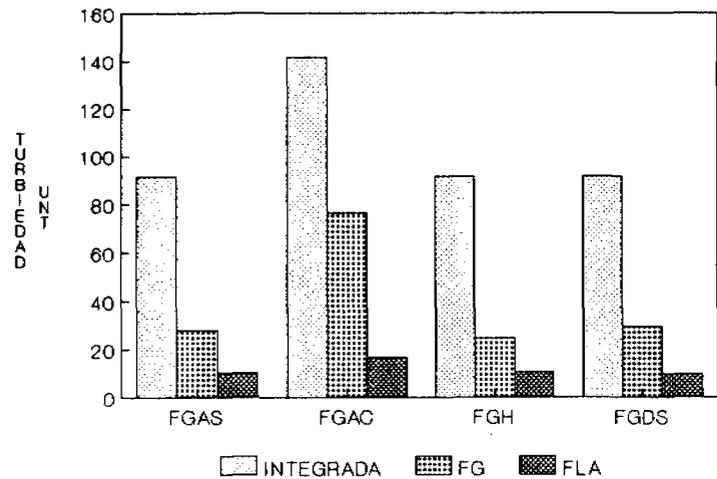


FIGURA 11.4 Promedio Solidos Suspendidos , Coliformes Fecales , Turbiedad , Color Real , Plantas Piloto . Unidades de Pretratamiento. Proyecto Pretratamientos. Periodo I.

El efluente de la alternativa con FGAS presentó una turbiedad promedio de 28 UNT con valores máximos de 180 UNT. La concentración promedio de sólidos suspendidos fue 5.7 mg/l, lo cual estaría cercano a lo recomendado en la literatura, sin embargo, éste presentó una desviación estándar de 8.9 y un máximo de 64 mg/l, lo que muestra la gran variabilidad de este parámetro en el efluente. Similares valores fueron medidos en los efluentes de las líneas con FGH y FGDS.

El FGAC durante su operación presentó promedios que superaron varias veces las recomendaciones de la literatura, tanto en turbiedad como en los restantes parámetros.

Durante este Periodo, la alcalinidad total es debido sólo a bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ) equivalente a la dureza total, la cual es dureza carbonática. Ambos parámetros en general no son removidos en los filtros gruesos ni en los filtros lentos. La tendencia es aumentar ligeramente al pasar por ambos sistemas, con excepción del FGAC en el cual la dureza baja. El aumento de la dureza puede deberse a la disolución de sales de calcio y magnesio, asociados con la alcalinidad, al interior de los filtros gruesos y de los filtros lentos (Germarn, 1982).

El oxígeno disuelto presentó concentraciones por encima 5.9 mg/l, en las alternativas de flujo ascendente, contrastando con las de flujo horizontal donde el oxígeno disuelto es del orden de 5.1 mg/l. Este contraste de niveles de oxígeno es debida a la posibilidad de reaeración con bajas pérdidas de energía en las etapas intermedias de las unidades flujo ascendentes y descendente, en contraste con la imposibilidad de realizar esta acción en las alternativas de flujo horizontal. Otro factor que influyó en la oxígeno disuelto fue la presencia de algas, las cuales durante el proceso de fotosíntesis aportan oxígeno al agua, especialmente en las alternativas ascendentes donde el agua tratada en las diferentes etapas se encuentra expuesta directamente al sol.

El impacto de las calidades de agua entregadas por los sistemas de Filtración gruesa, se puede apreciar al comparar la calidad de los efluentes de los FLA con las normas de calidad establecidas por el gobierno colombiano. Como se presenta en la Tabla 11.4 y en la Figura 11.4, los promedios de turbiedad en los efluentes del FLA 1, 3 y 5 fueron del orden de 10 UNT, siendo la norma Colombiana admisible, 5 UNT. El FLA 2 correspondiente a la línea con FGAC y el FLA 4 como línea de control presentaron 17 y 14 UNT respectivamente.

La remoción bacteriológica en las alternativas de mayor eficiencia, FGAS, FGH y FGDS, fue del orden del 97% (Ver Tabla 11.5), lo cual produjo promedios en la salida de estos sistemas entre 2097 y 3248 UFC/100 ml, superando también las recomendaciones establecidas para ser usadas en filtración lenta en arena. Sin embargo, es importante destacar que estos sistemas demuestran un buen potencial para actuar como barrera sanitaria, ya que sus reducciones superan los 1.5 log.

TABLA 11.5 Remoción de Sólidos Suspendidos (mg/l), Turbiedad (UNT), Color Real (UPC), Coliformes Fecales (UFC/100 ml). Plantas Pilotos. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período I.

PARAMETRO	AGUA CRUDA PROMEDIO	AGUA ACONDICIONADA		LINEA DE TRATAMIENTO	AGUA PRETRATADA					AGUA TRATADA			
		PROMEDIO	REMOCION PARCIAL %		REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO	REMOCION %		PROMEDIO	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
SOLIDOS SUSPENDIDOS	161	107	33.54	FGAS	72.89	65.51	43.00	5.7	94.67	96.46			
				FGAC (**)	48.60			55.0	48.60	65.84			
				FGH	*	*	*	4.3	95.98	97.33			
				FGDS	72.89	58.62	48.33	6.2	94.20	96.15			
TURBIEDAD	106	91.5	13.43	FGAS	43.28	34.30	17.59	28.1	69.29	73.41	10.3	63.34	90.25
				FGAC (**)				76.5	45.97	52.39	16.9	79.91	89.48
				FGH	*	*	*	24.0	73.77	77.29	10.6	55.83	89.97
				FGDS	43.71	31.26	17.23	29.3	67.98	72.28	9.7	66.89	90.82
COLOR REAL	73	70	4.11	FGAS	12.86	9.84	9.09	50	28.57	31.51	27	46.00	63.01
				FGAC (**)	9.89			82	9.89	12.77	35	57.32	62.77
				FGH	30.00	*	*	49	30.00	32.88	27	44.90	63.01
				FGDS	11.43	8.06	7.02	53	24.29	27.40	27	49.06	63.01
COLIFORMES FCALES	136147	90020	33.88	FGAS	64.71	85.31	55.07	2097	97.67	99.96	59.4	97.17	99.96
				FGAC (**)	73.26			24286	73.26	78.28	213	99.12	99.81
				FGH	*	*	*	2869	96.85	97.89	90.2	96.86	99.93
				FGDS	81.93	59.55	50.65	3248	96.39	97.61	116	96.43	99.91

\* La estructura del FGH dificulta la toma de muestras en las etapas intermedias (etapas 1 y 2)

\*\* El Período de medición para esta unidad comprende Enero - Junio de 1990. Las remociones fueron calculadas con los siguientes valores en la cruda e integrada respectivamente: Sólidos Suspendidos: 323.9 mg/l y 229.9 mg/l, Turbiedad: 160.7 UNT y 141.6 UNT, Color Real: 94 UPC y 91 UPC, y Coliformes Fecales: 111823 UFC/100ml y 90813 UFC/100ml.

La eficiencia de las unidades de filtración lenta en la remoción de coliformes fecales estuvo en el rango del 96.4 al 99.1%, incluyendo la unidad de control. En este sentido debe tenerse en cuenta que el nivel de contaminación a la entrada de los sistemas estuvo entre 174000 y 99 UFC/100 de coliformes fecales, los cuales superan los límites reportados en el aparte 2 para la utilización de FLA, lo cual se ve reflejado en los efluentes, que presentaron promedios entre 59 y 213 UFC/100 ml (Ver Tabla 11.5). La aplicación del concepto de multibarrera no se cumple. Estos promedios son altos, si se tiene en cuenta que deben ser eliminados en la desinfección, la cual a nivel de latino-américa presenta gran dificultad para el correcto funcionamiento debido a problemas como el oportuno suministro del desinfectante, la baja capacitación de los operadores, entre otros (Reiff, 1988). Además, los promedios de turbiedad y otros parámetros que limitan la desinfección presentaron desviaciones estándar elevadas, mostrando gran variabilidad, lo que hace aún más complicada la desinfección.

Durante este Periodo, los sistemas evaluados no lograron producir efluentes de agua con la calidad requerida para consumo humano. Los efluentes de los sistemas de pretratamiento presentaron niveles relativamente altos en sólidos suspendidos, lo cual impidió una buena formación de la capa biológica en los filtros lentos. Esto es consistente con la baja diversidad de especies observada al final del periodo I (Ver Anexo 6). Esto impidió que ocurrieran aquí fenómenos como transformaciones bioquímicas, colado y adsorción que son posibles gracias a la presencia de organismos como algas, protozoos, etc (Huisman, 1982). Estos pudieron ser un factor importante para la baja calidad bacteriológica que presentó el agua tratada (59-213 UFC/100 ml).

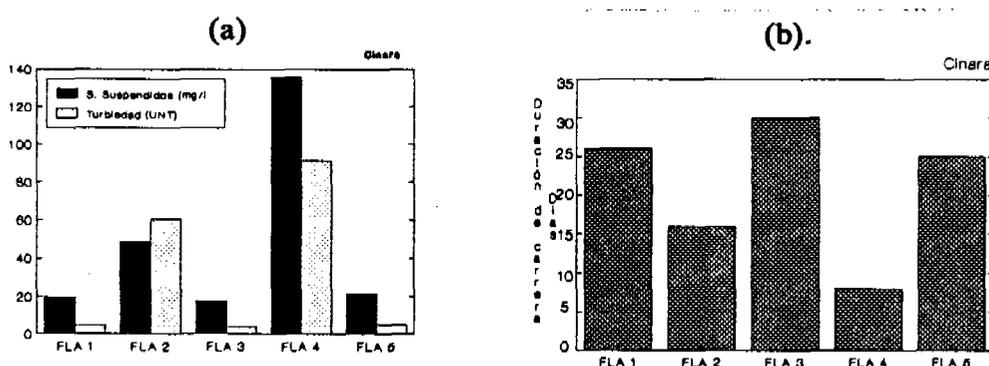
En la Tabla 11.6 se presenta el comportamiento de las unidades de pretratamiento y filtración lenta en arena en los parámetros hidráulicos, duración de carrera y pérdida de carga.

TABLA 11.6 Duración de carrera y pérdida de carga hidráulica. Líneas de tratamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo I.

PARAMETRO		FGAS1	FGAS2	FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGH1	FLA3	FLA4	FGDS1	FGDS2	FGDS3	FLA5
Duración de carrera (días)	Promedio	19	18	18	26	20	16	17	30	8	18	19	17	25
	Mínima	13	13	14	14	16	7	13	15	5	15	15	10	12
	Máxima	25	29	29	37	26	28	22	57	10	27	24	24	50
	N.C	15	14	14	9	8	9	15	8	21	14	14	14	10
P. Carga (cm)	Mínima	3.5	2.2	2.4	4.2	4.6	7.2	1.0	4.4	4.5	4.1	5.0	5.6	5.6
	Máxima	29.5	12.2	9.0	82.0	35.8	82.0	10.1	82.0	82.0	28.8	13.9	13.9	82.0

La alternativa con FGH presentó la pérdida de carga máxima más baja (10.1 cm) en comparación con las otras alternativas de filtración gruesa, las cuales presentaron sus mayores pérdidas de carga en las primeras etapas. La pérdida de carga total máxima en las alternativas ascendente y descendente en serie (sumadas las máximas de cada compartimiento) fueron 50.7 y 56.6 cm. respectivamente, mientras que la presentada por el FGAC alcanzó los 35.8 cm.

El alto contenido de sólidos y turbiedad en el afluente de los FLA, influyó en la duración de carrera en los filtros lentos, las cuales fueron en promedios significativamente inferiores a 30 días, periodo mínimo recomendado por varios autores (ver aparte 2.2.3). Como puede observarse en la Figura 11.5 (a) y (b), existe una relación inversa entre el contenido de sólidos suspendidos y turbiedad en el afluente de los FLA y la duración de la carrera de los mismos; entre mayor sea el contenido de sólidos y turbiedad afluente, la duración de las carreras son más cortas. De esta manera el FLA4 presentó la duración de carrera más baja (8 días) para la mayor concentración de sólidos suspendidos y turbiedad, 135.7 mg/l y 91.3 UNT. De igual manera, el FLA 3 presentó el promedio más alto de duración de carrera (30 días) y los valores de sólidos suspendidos y turbiedad más bajos en el afluente del FLA, 4.3 mg/l y 24 UNT.



**FIGURA 11.5** Sólidos Suspendidos y turbiedad en el afluente de los FLA (a) y Carreras de filtración de los FLA (b). Plantas Piloto. Periodo I.

Los FLA de las líneas con FGAS y FGDS presentaron promedios de duración de carrera de 25 y 26 días respectivamente, con contenidos de sólidos suspendidos en sus afluentes entre 5.7 y 6.2 mg/l. Estas duraciones de carrera son poco recomendadas porque raspados tan constantes en los filtros, no permiten el adecuado desarrollo de la capa biológica y además aumentan considerablemente los costos de operación y mantenimiento (Spencer, 1991).

### 11.1.3 Periodos II, III y IV

#### 11.1.3.1 Comportamiento de los Acondicionadores

A partir de los resultados del Periodo I, se instalaron tres unidades de Filtración Gruesa Dinámica para su evaluación, cada una de ellas operando con lecho filtrante similar, pero con diferentes velocidades de filtración, las cuales estuvieron entre 1 m/h y 3 m/h (ver Tabla 7.5).

En las Tablas 11.7 a 11.9 se presentan las estadísticas descriptivas de los parámetros evaluados y en las Figuras 11.6 a 11.8 se muestran los promedios para el agua cruda y los efluentes de los FGDí en sólidos suspendidos, turbiedad, color real y coliformes fecales.

Los filtros gruesos dinámicos reafirmaron en estos periodos su importante efecto sobre la remoción de sólidos suspendidos, en cuyo parámetro presentaron remociones entre el 57 y el 80% y en turbiedad, entre el 35% y el 45% (Ver Tabla 11.10).

Estos filtros gruesos no solamente son eficientes en la remoción de parámetros físicos sino también bacteriológicos, obteniéndose remociones de coliformes fecales entre el 33% y el 63%, en el Periodo II y entre el 57.9% y el 77.7% en los Periodos III y IV (Tabla 11.11). Al igual que en el Periodo I, el color real presenta bajas remociones alcanzando valores promedio entre el 15.5% y el 17% para Periodo II y del 11.4% y 13.2% para los Periodos III y IV.

Los filtros dinámicos mostraron a lo largo de los periodos evaluados una buena eficiencia para remover hierro y manganeso, especialmente en los Periodos III y IV donde se removió entre el 46% y el 75% de hierro y entre el 52% y el 60% respectivamente. Estas altas remociones y la baja remoción de color real sugiere que este último se debe principalmente a material húmico y sólo una pequeña fracción a sustancias minerales.

#### 11.1.3.2 Comportamiento de las Líneas de Investigación

En las Figuras 11.9 a 11.11 se presentan los promedios para sólidos suspendidos, turbiedad, color real y coliformes fecales, obtenidos en los efluentes de las líneas investigadas, durante los tres periodos en mención. En las Tablas 11.12 a 11.14 se incluyen las estadísticas descriptivas de los parámetros medidos para los mismos periodos y en el Anexo 5 los de todas las etapas de cada línea de filtración gruesa en los parámetros de sólidos suspendidos, turbiedad, color real y coliformes fecales.

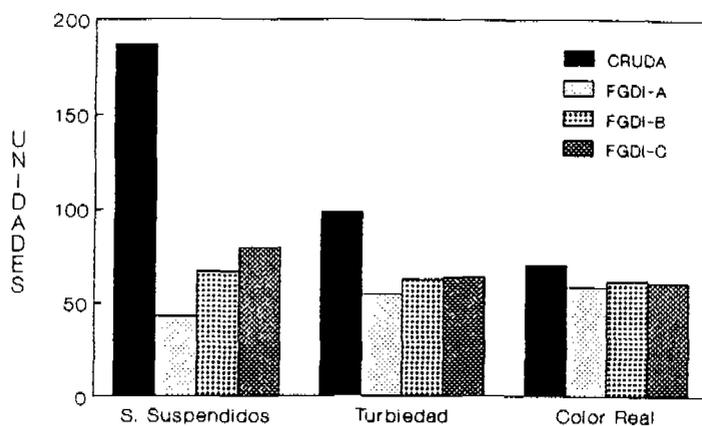


FIGURA 11.6 Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.

TABLA 11.7 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	ACONDICIONADORES			
		CRUDA	FGDi-A	FGDi-B	FGDi-C
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	187	43	67	80
	Desviación	185	53	95	117
	Mínimo	28	3.2	4.3	4.3
	Máximo	978	279	522	625
	No. Datos	36	36	36	36
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	99	55	63	64
	Desviación	96	57	66	66
	Mínimo	20	7.5	7.5	12
	Máximo	750	400	450	500
	No. Datos	327	327	327	327
COLOR REAL (UPC)	Promedio	71	59	62	61
	Desviación	53	45	46	46
	Mínimo	18	16	15	15
	Máximo	230	240	220	220
	No. Datos	36	36	36	36
COLIFORMES FCALES (UFC/100mL)	Promedio	42658	19134	15853	28409
	Desviación	30567	31816	12602	38342
	Mínimo	7700	1900	818	1300
	Máximo	117000	158000	49000	204000
	No. Datos	31	31	31	31
ESTREPTOCOCOS FCALES (UFC/100mL)	Promedio	17598	5477	6612	8001
	Desviación	16074	4210	5587	5971
	Mínimo	1970	873	1191	570
	Máximo	52000	12000	19400	17909
	No. Datos	9	9	9	8

TABLA 11.7 Estadísticas Descriptivas. Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO, Hierro y Manganeso. Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	ACONDICIONADORES		
			FGDi-A	FGDi-B	FGDi-C
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	205	135	157	181
	Desviación	86	35	66	84
	Mínimo	121	92	88	98
	Máximo	355	188	277	316
	No. Datos	5	5	5	4
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	45	42	44	54
	Desviación	17	6	6	15
	Mínimo	30	30	38	32
	Máximo	69	49	53	74
	No. Datos	5	5	5	4
D.Q.O. (mg/L O2)	Promedio	18.3	< 8.1	< 10.6	12.7
	Desviación	12.2	3.7	5.5	7.9
	Mínimo	7.0	< 5.0	< 5.0	7.2
	Máximo	41.8	15.2	21.1	26.2
	No. Datos	5	5	5	4
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	4.63	2.85	2.75	3.37
	Desviación	3.03	2.28	1.94	1.55
	Mínimo	0.50	0.19	0.11	1.40
	Máximo	9.00	6.40	5.40	5.20
	No. Datos	4	4	4	3
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.57	0.37	0.50	0.46
	Desviación	0.33	0.18	0.33	0.24
	Mínimo	0.23	0.15	0.10	0.16
	Máximo	1.08	0.66	1.00	0.74
	No. Datos	4	4	4	4

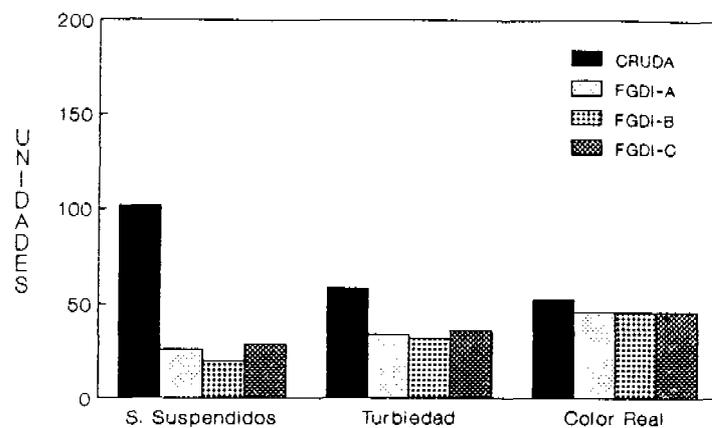


FIGURA 11.7 Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III.

TABLA 11.8 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	ACONDICIONADORES			
		CRUDA	FGDí-A	FGDí-B	FGDí-C
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	102	26	20	29
	Desviación	119	42	28	51
	Mínimo	17	2.2	2.2	2.6
	Máximo	696	214	160	270
	No. Datos	50	50	50	50
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	59	34	32	36
	Desviación	54	35	31	37
	Mínimo	18	6.4	5.9	7.0
	Máximo	500	320	265	300
	No. Datos	412	412	412	412
COLOR REAL (UPC)	Promedio	53	46	46	46
	Desviación	29	22	23	21
	Mínimo	21	19	19	19
	Máximo	190	140	160	140
	No. Datos	50	50	50	50
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	30185	8096	7147	12711
	Desviación	21419	8213	7586	12927
	Mínimo	3800	1018	850	1100
	Máximo	94000	53000	48000	63000
	No. Datos	53	53	53	53
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100mL)	Promedio	8262	2367	963	2110
	Desviación	5294	2614	603	1615
	Mínimo	1600	333	100	400
	Máximo	17700	7400	1667	4700
	No. Datos	5	5	5	5

TABLA 11.8 Estadísticas Descriptivas. Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO, Hierro y Manganeso. Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo III. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	ACONDICIONADORES		
			FGDi-A	FGDi-B	FGDi-C
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	159	130	119	123
	Desviación	33	20	14	15
	Mínimo	113	106	98	102
	Máximo	206	156	134	142
	No. Datos	6	6	6	6
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	49	43	42	46
	Desviación	9	9	9	9
	Mínimo	35	30	33	34
	Máximo	60	56	58	58
	No. Datos	6	6	6	6
D.Q.O. (mg/L O2)	Promedio	12.9	8.6	< 9.8	< 9.6
	Desviación	2.6	2.4	3.6	4.6
	Mínimo	9.6	6.4	< 5.0	< 5.0
	Máximo	18.0	13.2	16.8	18.8
	No. Datos	6	6	6	6
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	3.54	1.90	1.67	1.82
	Desviación	1.24	0.87	0.75	0.89
	Mínimo	2.00	0.80	0.80	0.60
	Máximo	6.00	3.40	2.90	3.20
	No. Datos	6	6	6	6
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.80	0.43	0.38	0.48
	Desviación	0.43	0.28	0.23	0.33
	Mínimo	0.20	0.10	0.10	0.10
	Máximo	1.48	0.94	0.80	1.10
	No. Datos	6	6	6	6

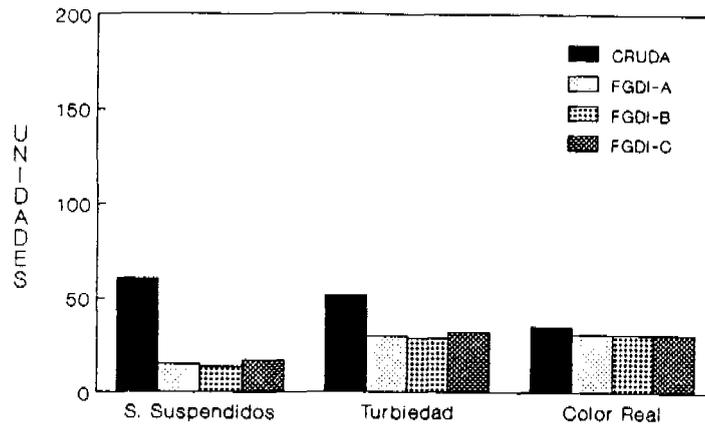


FIGURA 11.8 Promedio de Sólidos Suspendidos, Turbiedad y Color Real en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.

TABLA 11.9 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en las Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	ACONDICIONADORES			
		CRUDA	FGDi-A	FGDi-B	FGDi-C
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	61	15	14	17
	Desviación	34	16	16	17
	Mínimo	21	3.0	2.8	4.6
	Máximo	186	93	94	100
	No. Datos	30	30	30	30
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	52	30	29	32
	Desviación	58	39	39	44
	Mínimo	17	6.4	5.8	6.0
	Máximo	500	320	320	360
	No. Datos	377	377	377	377
COLOR REAL (UPC)	Promedio	35	31	31	31
	Desviación	12	11	11	11
	Mínimo	16	13	12	13
	Máximo	72	63	65	58
	No. Datos	30	30	30	30
COLIFORMES FCALES (UFC/100mL)	Promedio	88609	23283	19787	33088
	Desviación	66218	40234	37861	41821
	Mínimo	18182	3900	3400	6850
	Máximo	300000	231000	218000	240000
	No. Datos	30	30	30	30
ESTREPTOCOCOS FCALES (UFC/100mL)	Promedio	2763	617	431	667
	Desviación	620	247	149	271
	Mínimo	2050	360	190	360
	Máximo	3700	1025	600	1075
	No. Datos	4	4	4	4

TABLA 11.9 Estadísticas Descriptivas. Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO, Hierro y Manganeseo. Unidades de Acondicionamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	ACONDICIONADORES		
			FGDi-A	FGDi-B	FGDi-C
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	148	102	102	99
	Desviación	18	2	3	4
	Mínimo	129	99	98	95
	Máximo	172	103	105	105
	No. Datos	3	3	3	3
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	43	33	35	31
	Desviación	8	3	1	8
	Mínimo	35	30	34	23
	Máximo	50	35	36	39
	No. Datos	2	2	2	2
D.Q.O. (mg/L O2)	Promedio	< 9.5	< 5.1	< 5.3	< 5.3
	Desviación	2.9	0.1	0.3	0.3
	Mínimo	< 5.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0
	Máximo	12.4	5.2	5.6	5.6
	No. Datos	4	4	4	4
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	4.45	1.23	1.09	1.20
	Desviación	0.70	0.26	0.34	0.37
	Mínimo	3.60	0.80	0.50	0.58
	Máximo	5.50	1.48	1.34	1.48
	No. Datos	4	4	4	4
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.88	0.33	0.31	0.35
	Desviación	0.27	0.14	0.14	0.15
	Mínimo	0.55	0.13	0.12	0.13
	Máximo	1.30	0.52	0.51	0.55
	No. Datos	4	4	4	4

TABLA 11.10

Remoción de turbiedad y sólidos suspendidos Unidades de Acondicionamiento.  
Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTO. Periodos II, III y IV.

Periodo	Sitio	Turbiedad		Sólidos Suspendidos	
		Promedio (UNT)	Remoción (%)	Promedio (mg/l)	Remoción (%)
II	Cruda	99		187	
	FGDi A	55	44.4	43	77.0
	FGDi B	63	36.4	67	64.2
	FGDi C	64	35.3	80	57.2
III	Cruda	59		102	
	FGDi A	34	42.4	26	74.5
	FGDi B	32	45.8	20	80.4
	FGDi C	36	39.0	29	71.7
IV	Cruda	52		61	
	FGDi A	30	42.3	15	75.4
	FGDi B	29	44.2	14	77.0
	FGDi C	32	38.5	17	72.1

TABLA 11.11

Remoción de color real y coliformes fecales. Unidades de acondicionamiento.  
Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.

Periodo	Sitio	Color real		Coliformes fecales		
		Promedio (UPC)	Remoción (%)	Promedio (UFC/100ml)	Remoción (%)	# Log
II	Cruda	71		42658		
	FGDi A	59	17.0	19134	55.1	0.35
	FGDi B	62	12.7	15853	62.8	0.43
	FGDi C	60	15.5	28409	33.4	0.18
III	Cruda	53		30185		
	FGDi A	46	13.2	8096	73.2	0.57
	FGDi B	46	13.2	7147	76.3	0.63
	FGDi C	46	13.2	12711	57.9	0.38
IV	Cruda	35		88609		
	FGDi A	31	11.4	23283	73.7	0.58
	FGDi B	31	11.4	19787	77.7	0.65
	FGDi C	31	11.4	33088	62.7	0.43



TABLA 11.12 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II. (Continuación).

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	5.2	4.7	7.5	5.4	6.0	5.0	4.2	4.1	3.9	4.6	5.4	4.9
	Desviación	0.4	0.5	1.8	2.1	0.9	2.2	0.6	1.4	0.6	1.8	0.8	1.7
	Mínimo	4.4	3.8	5.1	3.7	4.8	2.1	3.2	3.0	2.9	2.2	4.4	3.2
	Máximo	5.8	5.6	11.0	10.8	7.6	9.4	5.0	6.7	4.6	7.7	7.4	9.0
	No. Datos	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	32.5	32.7	36.9	38.5	33.6	35.9	36.5	38.8	38.5	40.6	36.5	37.2
	Desviación	1.9	2.3	2.3	1.5	1.6	1.8	2.1	1.4	1.9	2.6	0.9	1.8
	Mínimo	30.0	29.3	34.0	37.0	31.0	33.9	34.0	36.8	36.3	36.0	35.7	34.3
	Máximo	35.0	35.5	41.0	41.2	35.7	38.0	39.0	40.5	41.0	43.0	38.3	39.0
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	23.5	24.0	26.3	29.7	23.5	27.3	26.8	29.8	28.7	31.4	26.0	28.5
	Desviación	3.9	3.8	6.0	4.6	3.9	4.2	4.3	4.0	4.7	5.7	4.8	4.7
	Mínimo	19.0	18.6	18.9	23.1	20.5	23.2	23.1	23.9	24.2	22.1	20.4	21.9
	Máximo	30.7	30.4	36.5	37.1	31.0	34.7	35.0	35.8	37.4	38.0	34.4	35.8
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
pH (unidades)	Mínimo	7.1	7.0	7.8	7.6	7.2	7.3	7.3	7.4	7.3	7.4	7.4	7.4
	Máximo	7.4	7.4	9.3	8.1	7.8	7.7	7.9	7.8	8.3	8.1	8.0	7.6
	No. Datos	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

TABLA 11.12 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	205	151	105	100	97	91	101	96	104	103	94	87
	Desviación	86	67	10	13	24	7	10	6	7	5	10	9
	Mínimo	121	93	95	82	52	83	89	85	95	96	81	78
	Máximo	355	279	123	122	123	105	117	102	114	109	112	103
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	45	44	34	32	34	28	29	28	40	37	35	29
	Desviación	17	13	14	12	19	9	8	6	10	6	8	5
	Mínimo	30	27	14	13	10	14	21	19	26	32	26	24
	Máximo	69	63	58	45	63	41	43	38	56	48	44	38
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
D Q O (mg/L O2)	Promedio	18.3	10.2	<5.0	<5.0	<5.1	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	Desviación	12.2	4.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Mínimo	7.0	6.6	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	Máximo	41.8	19.4	5.0	5.0	5.3	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	4.63	3.66	0.55	<0.17	1.01	0.17	0.56	0.28	0.57	0.14	0.36	<0.13
	Desviación	3.03	3.06	0.26	0.12	0.81	0.06	0.45	0.13	0.41	0.06	0.19	0.11
	Mínimo	0.50	0.22	0.30	<0.01	0.35	0.10	0.17	0.17	0.18	0.07	0.18	<0.01
	Máximo	9.00	8.60	0.95	0.35	2.40	0.25	1.30	0.50	1.20	0.23	0.65	0.28
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.57	0.45	0.07	<0.04	<0.08	<0.03	0.14	0.05	<0.06	<0.04	<0.07	<0.01
	Desviación	0.33	0.23	0.03	0.03	0.08	0.01	0.09	0.02	0.05	0.05	0.06	0.00
	Mínimo	0.23	0.19	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Máximo	1.08	0.82	0.11	0.08	0.20	0.04	0.24	0.06	0.14	0.13	0.17	0.01
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

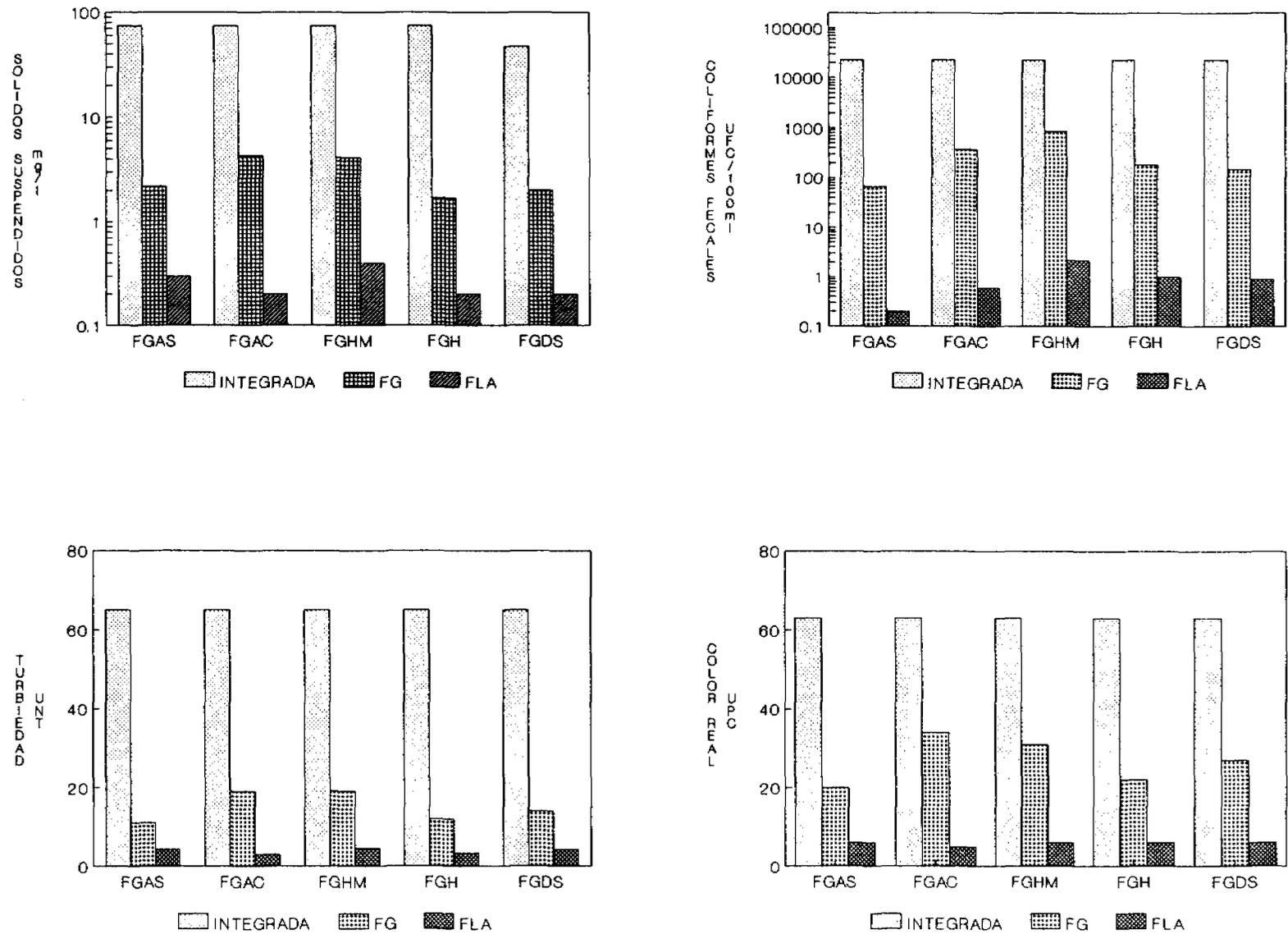


FIGURA 11.9 Promedios Sólidos Suspensos , Coliformes Fecales , Turbiedad , Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.

TABLA 11.13 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período III.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	102	29	1.3	0.1	4.5	0.3	2.9	0.3	1.2	0.1	1.5	0.2
	Desviación	119	44	1.4	0.2	4.8	0.4	3.0	0.2	1.5	0.2	2.1	0.2
	Mínimo	17	2.9	0.2	0.0	0.7	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0
	Máximo	696	228	9.4	0.7	21	2	16	0.8	9.6	0.7	14.2	0.8
	No. Datos	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	59	35	8.2	2.0	16	3.3	13	3.1	8.2	2.4	9.2	3.1
	Desviación	54	35	7.0	1.7	12	4.2	10	3.3	6.7	1.9	7.3	2.9
	Mínimo	18	7.1	1.7	0.5	3.5	0.6	3.0	0.5	2.2	0.5	2.4	0.6
	Máximo	500	310	51	16	80	39	75	31	55	18	55	28
	No. Datos	412	412	412	412	412	412	412	412	412	412	412	412
COLOR REAL (UPC)	Promedio	53	46	21	7	33	10	29	11	22	9	24	10
	Desviación	29	23	11	4	17	8	17	6	10	5	11	6
	Mínimo	21	18	3	1	12	2	7	3	8	2	8	2
	Máximo	190	155	75	19	125	42	125	31	66	28	75	30
	No. Datos	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	30185	7964	38	0.1	440	2.7	504	2.0	75	0.3	38	0.3
	Desviación	21419	7107	37	0.3	753	5.5	426	2.8	71	0.6	32	0.5
	Mínimo	3800	1750	1	0	56	0	108	0	4	0	6	0
	Máximo	94000	50000	175	1	5600	35	2220	18	393	3	162	2
	No. Datos	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100 mL)	Promedio	8262	1492	6	0.2	55	1.0	100	0.6	18	0.4	24	1.0
	Desviación	5294	807	2	0.4	26	1.3	54	0.8	17	0.5	23	1.3
	Mínimo	1600	300	4	0	23	0	34	0	2	0	7	0
	Máximo	17700	2375	10	1	88	3	160	2	48	1	68	3
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

∞ ∞

TABLA 11.13 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período III. (Continuación).

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	159	127	94	96	107	94	102	95	95	91	98	95
	Desviación	33	13	8	13	8	11	13	13	10	17	9	9
	Mínimo	113	110	84	80	95	84	85	84	85	61	84	82
	Máximo	206	144	108	122	122	117	123	120	110	117	107	106
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	49	52	40	41	45	42	43	40	40	38	37	35
	Desviación	9	19	23	25	21	23	25	26	26	27	26	28
	Mínimo	35	34	24	20	30	26	17	16	23	20	22	16
	Máximo	60	91	92	96	91	93	95	96	96	97	94	96
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
D Q O (mg/L O2)	Promedio	12.9	10.7	<6.8	<5.9	<6.5	<5.3	<5.9	<5.3	<6.4	<5.6	<5.5	<5.3
	Desviación	2.6	2.5	1.8	1.8	1.1	0.4	1.0	0.5	1.0	0.7	0.8	0.6
	Mínimo	9.6	7.6	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	Máximo	18.0	15.6	9.6	10.0	8.0	6.0	7.2	6.4	7.2	6.4	7.2	6.4
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	5	6	5	6	5
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	3.54	2.08	<0.24	<0.1	0.69	0.23	0.55	<0.18	0.42	<0.13	<0.45	<0.14
	Desviación	1.24	0.68	0.13	0.06	0.19	0.10	0.26	0.16	0.11	0.10	0.21	0.07
	Mínimo	2.00	1.00	<0.01	<0.01	0.40	0.10	0.10	<0.01	0.20	<0.01	<0.01	<0.01
	Máximo	6.00	2.90	0.40	0.20	0.91	0.40	0.96	0.52	0.52	0.30	0.60	0.21
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.80	0.45	0.08	<0.02	0.17	<0.03	0.14	<0.05	0.08	<0.02	0.07	<0.02
	Desviación	0.43	0.27	0.02	0.01	0.09	0.03	0.05	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01
	Mínimo	0.20	0.10	0.04	<0.01	0.05	<0.01	0.06	<0.01	0.03	<0.01	0.03	<0.01
	Máximo	1.48	0.96	0.12	0.04	0.33	0.09	0.22	0.10	0.13	0.04	0.11	0.05
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

TABLA 11.13 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período III. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	5.3	4.9	6.1	4.4	5.6	4.9	3.6	4.3	3.3	4.0	4.8	4.4
	Desviación	0.7	0.6	0.6	0.9	1.0	1.0	0.8	0.9	0.7	1.5	0.5	0.8
	Mínimo	4.3	3.8	5.1	2.9	4.3	3.1	2.5	2.9	1.9	1.8	4.2	3.3
	Máximo	6.3	5.6	6.9	6.1	7.2	6.2	4.8	6.2	4.1	7.0	5.5	5.7
	No. Datos	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
DUREZA TOTAL (mg/L CaCO3)	Promedio	30.9	29.1	32.3	31.6	29.8	30.5	31.7	32.2	30.8	33.4	30.2	32.0
	Desviación	6.1	5.7	6.7	4.9	5.9	6.0	6.0	6.8	5.6	7.4	5.5	6.4
	Mínimo	20.3	19.5	21.8	22.1	20.3	20.6	21.4	21.0	21.0	22.1	21.8	22.1
	Máximo	40.5	37.5	41.2	37.0	39.0	37.0	40.5	42.7	37.5	43.5	39.0	42.0
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
ALCALINIDAD TOTAL (mg/L CaCO3)	Promedio	17.9	18.8	20.8	24.2	18.7	20.2	20.5	21.8	20.7	22.7	20.3	21.8
	Desviación	6.0	6.3	6.8	8.8	6.2	5.9	7.6	6.9	7.4	7.5	6.7	5.7
	Mínimo	10.3	9.8	12.4	12.1	12.0	11.3	11.2	11.5	11.2	11.8	11.8	14.5
	Máximo	29.1	29.0	33.0	37.2	30.0	30.2	35.0	32.0	35.0	34.0	32.0	31.0
	No. Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
pH (unidades)	Mínimo	6.7	6.6	7.0	7.2	6.5	7.2	6.9	7.2	7.0	7.2	7.1	7.1
	Máximo	7.5	7.3	8.0	8.7	7.6	7.4	7.3	7.6	7.3	7.6	7.6	7.6
	No. Datos	9	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

06

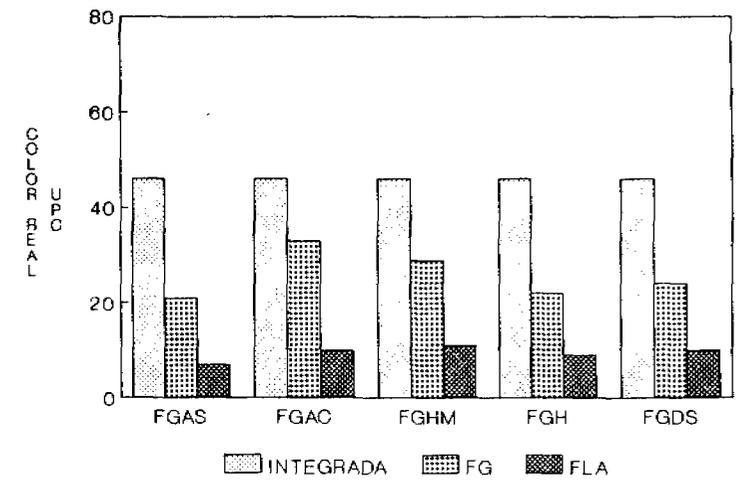
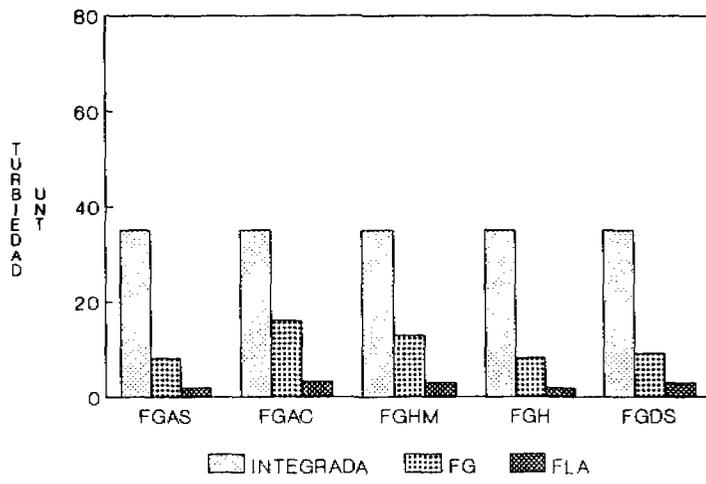
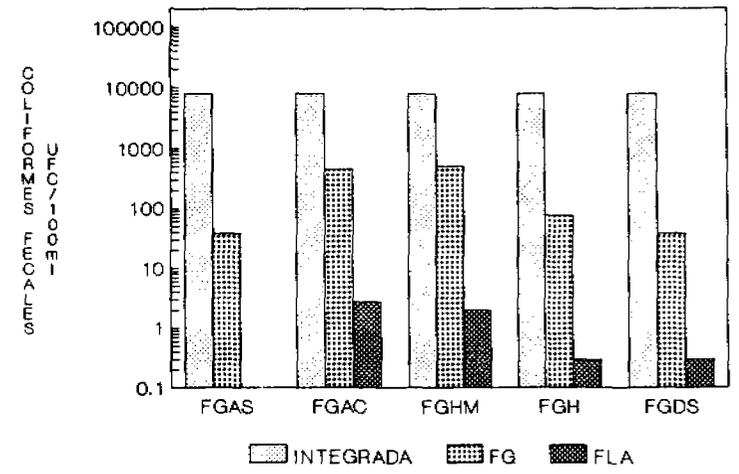
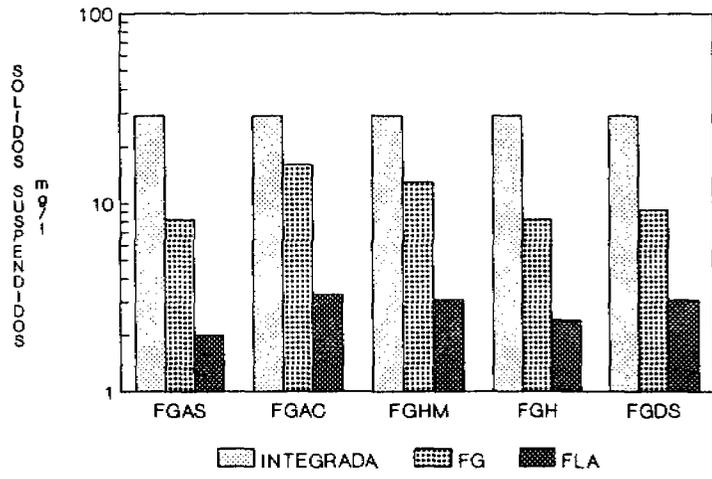


FIGURA 11.10 Promedios Solidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad, Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto Pretratamientos. Periodo III.

TABLA 11.14 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período IV.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	61	14	1.1	0.1	3.0	0.2	2.1	0.2	0.9	0.1	1.2	0.1
	Desviación	34	11	0.8	0.2	1.9	0.2	1.5	0.2	0.6	0.2	0.8	0.2
	Mínimo	21	3.1	0.3	0.0	0.6	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0
	Máximo	186	61	3.9	0.8	9.4	1.0	6.3	0.8	2.8	0.8	3.5	1.0
	No. Datos	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	52	30	6.8	1.3	13	1.5	11	1.6	6.3	1.4	7.8	1.5
	Desviación	58	40	7.2	1.3	16	1.9	12	1.9	6.0	1.7	8.2	1.2
	Mínimo	17	6.2	1.4	0.4	2.0	0.4	2.5	0.4	1.5	0.2	1.8	0.5
	Máximo	500	320	48	19	130	20	125	24	37	18	75	17
	No. Datos	377	377	377	377	377	377	377	377	377	377	377	377
COLOR REAL (UPC)	Promedio	35	30	14	6	21	7	18	8	14	7	16	7
	Desviación	12	11	7	3	9	3	8	3	6	4	6	3
	Mínimo	16	10	2	1	7	1	4	1	3	1	4	1
	Máximo	72	55	33	10	46	15	38	13	31	17	31	13
	No. Datos	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
COLIFORMES FECALES (UFC/100ml)	Promedio	88609	15598	58	0.5	631	1.8	732	1.1	123	0.2	61	0.2
	Desviación	66218	21965	45	0.7	535	3.0	565	1.2	160	0.4	31	0.5
	Mínimo	18182	1840	0	0	148	0	100	0	31	0	12	0
	Máximo	300000	121000	196	2	2900	12	2833	4	940	1	137	2
	No. Datos	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100 ml)	Promedio	2763	495	4	0.0	18	0.3	40	0.5	139	0.0	29	1.0
	Desviación	620	265	3	0.0	5	0.5	37	0.5	179	0.0	12	1.2
	Mínimo	2050	200	2	0	10	0	10	0	15	0	14	0
	Máximo	3700	900	9	0	24	1	101	1	448	0	46	3
	No. Datos	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4

TABLA 11.14 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	148	98	95	93	100	88	99	88	91	89	86	85
	Desviación	18	2	2	4	3	2	7	0	4	6	5	8
	Mínimo	129	95	92	88	97	85	94	88	88	83	81	80
	Máximo	172	100	98	97	104	90	109	89	97	98	92	96
	No. Datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	43	34	30	32	38	29	33	29	29	30	33	31
	Desviación	8	4	2	3	3	2	3	1	1	4	2	3
	Mínimo	35	30	28	29	35	27	30	28	28	26	31	28
	Máximo	50	37	31	34	41	31	36	30	30	33	35	33
	No. Datos	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
D Q O (mg/L O2)	Promedio	<9.5	<5.6	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	Mínimo	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	Máximo	12.4	6.8	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	4.45	1.12	0.17	0.07	0.27	<0.06	0.19	<0.05	0.21	<0.04	0.24
Desviación		0.70	0.34	0.07	0.04	0.12	0.05	0.08	0.05	0.11	0.04	0.14	0.03
Mínimo		3.60	0.55	0.09	0.02	0.17	<0.01	0.08	<0.01	0.12	<0.01	0.13	<0.01
Máximo		5.50	1.40	0.29	0.13	0.47	0.12	0.30	0.13	0.40	0.11	0.48	0.08
No. Datos		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.88	0.34	<0.02	<0.01	0.06	<0.01	<0.04	<0.01	0.03	<0.01	0.03	<0.01
	Desviación	0.27	0.15	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	Mínimo	0.55	0.13	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.03	<0.01
	Máximo	1.30	0.55	0.03	0.02	0.10	0.02	0.07	0.01	0.04	0.01	0.04	0.02
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

93

TABLA 11.14 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1		LINEA 2		LINEA 3		LINEA 4		LINEA 5	
				FGAS3	FLA1	FGAC	FLA2	FGHM3	FLA3	FGH3	FLA4	FGDS3	FLA5
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	5.6	4.7	6.1	4.5	6.6	5.1	3.8	5.0	3.6	4.5	5.3	5.5
	Desviación	0.6	0.7	1.2	0.4	1.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.9	0.5	0.9
	Mínimo	5.0	3.9	4.8	4.0	3.8	4.5	3.2	4.4	3.1	3.6	4.8	4.6
	Máximo	6.5	5.6	7.5	5.2	8.3	6.3	4.7	6.0	4.6	5.9	5.9	6.8
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
DUREZA TOTAL (mg/L CaCO3)	Promedio	29.3	29.7	29.8	30.5	29.4	32.1	28.5	29.8	30.7	30.8	29.2	29.8
	Desviación	4.6	3.0	3.5	3.0	3.0	2.8	3.0	2.1	3.9	2.6	2.6	2.4
	Mínimo	24.0	24.8	25.5	28.5	25.5	28.5	24.8	28.5	25.5	28.5	26.3	27.0
	Máximo	34.5	32.5	35.2	35.6	33.7	36.0	33.0	33.5	34.5	35.2	33.3	33.5
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ALCALINIDAD TOTAL (mg/L CaCO3)	Promedio	13.7	12.7	15.4	17.6	15.2	16.5	14.8	16.6	18.0	17.4	13.6	16.7
	Desviación	6.1	7.3	6.1	5.5	4.6	5.5	4.9	5.5	4.6	5.6	7.0	5.3
	Mínimo	6.7	2.6	10.0	14.0	12.0	12.0	11.3	11.8	12.5	12.5	4.8	12.5
	Máximo	23.4	23.2	25.8	27.2	23.1	25.8	23.3	26.0	24.9	26.8	24.3	25.7
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
pH (unidades)	Mínimo	7.0	7.0	7.2	7.3	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.2	7.2	7.1
	Máximo	7.4	7.3	8.0	7.6	7.6	7.4	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5
	No. Datos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

94

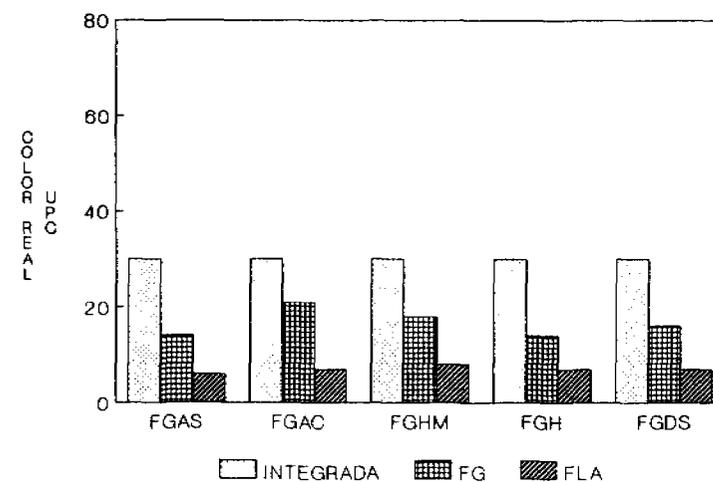
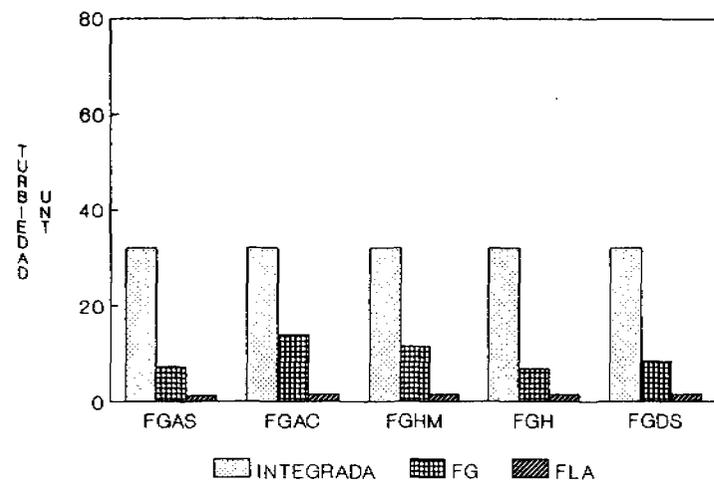
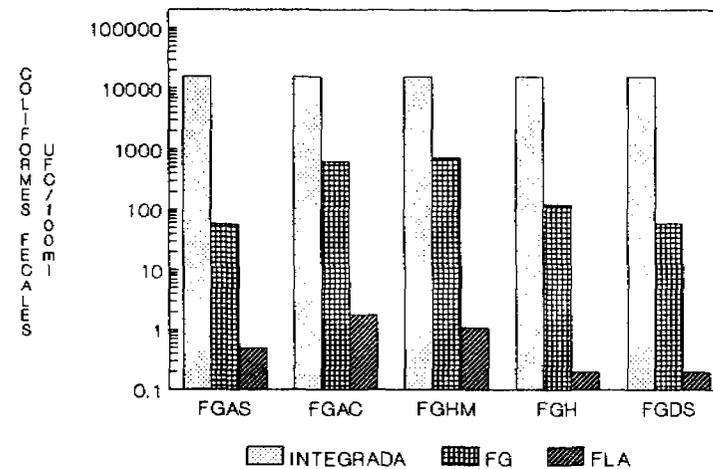
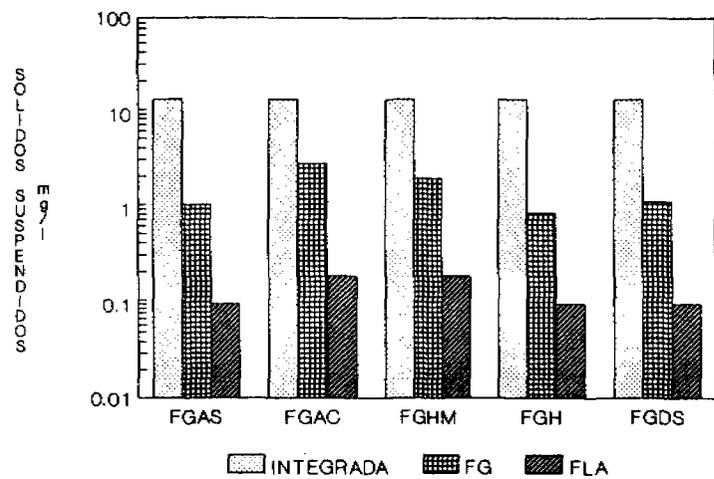


FIGURA II.11 Promedios Sólidos Suspendedos, Coliformes Fecales, Turbiedad, Color Real. Plantas Piloto. Unidades de Pretratamiento. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.

Durante el Periodo II, los sólidos suspendidos fueron removidos eficientemente en los filtros gruesos, alcanzando un máximo de 99% en el FGH cuyo valor promedio en el efluente fue de 1.7 mg/l con una desviación de 1.6, indicando una baja dispersión de los datos. Esta línea de pretratamiento presentó un comportamiento similar en los Periodos III y IV en donde los promedios en el efluente estuvieron entre 0.9 y 1.2 mg/l, semejantes a los presentados por el FGAS y el FGDS. La menor eficiencia la presentó el FGAC a lo largo de los tres periodos, produciendo un efluente con promedios entre 3.0 y 4.5 mg/l, valores aceptados para un agua a ser tratada por filtración lenta en arena. Wegelin, (1986) recomienda 5.0 mg/l.

En cuanto a la turbiedad, las líneas evaluadas presentaron buenas eficiencias, con remociones parciales hasta del 83% en la línea con FGAS, con promedios un poco altos en el FGAC (19 UNT), en comparación con los recomendados para ser usados en filtración lenta en arena, presentando ésta línea las más altas remociones, sin embargo, el efluente de los FLA arrojó valores promedio, inferiores a la norma admisible para turbiedad (5 UNT), destacándose el Periodo IV en el cual se obtuvieron promedios entre 1.3 y 1.6 UNT, con remociones acumuladas hasta del 97.60%.

En la remoción de color real en las diferentes líneas evaluadas, se destaca la línea con FGAS que logró en el Periodo II, una eficiencia del 69.2% entregando al FLA1 un valor promedio de 20 UPC, similar al promedio obtenido en el Periodo III. En la línea con FGAC se obtuvo el valor promedio más alto (36 UPC) en el Periodo II, sin embargo, el filtro lento fue muy eficiente al bajar el promedio a 5 UPC. La eficiencia se mejora en el Periodo IV donde se obtienen remociones acumuladas del 60% con un promedio de 14 UPC en el FGAS, igual a lo presentado en el FGH.

El valor de color real obtenido en los filtros lentos estuvo entre 6 UPC y 8 UPC (Periodo IV). Estos valores son muy importantes porque permiten demostrar las buenas eficiencias en la remoción del color real en los FLA (52 al 88%), superando así las afirmaciones de Huisman Ellis, 1985 and Wood, 1974; Cleasby et al, 1984 y de otros investigadores sobre las bajas remociones de color real en los FLA (25 - 30%).

Los sistemas de pretratamiento resultan aun más eficientes en la remoción de coliformes fecales, los cuales son reducidos drásticamente, destacándose la línea con FGAS en los Periodos II y III con valores promedio de 67 UFC/100 ml y 38 UFC/100 ml respectivamente, y la línea del FGDS en los Periodos III y IV con valores promedio de 38 y 61 UFC/100 ml respectivamente. Las altas remociones hacen que el filtro lento trabaje más eficientemente, al final de los cuales se obtuvieron promedios de 0.1 UFC/100 ml con eficiencias acumuladas del 99.9997% correspondiente a 5.5 logs.

Estos resultados reafirman la importancia de la aplicación del concepto de multibarrera en la obtención de calidades de agua con un mínimo riesgo sanitario, garantizando la potabilidad del agua que se logra finalmente con la desinfección como barrera de seguridad.

Así mismo, en la remoción de estreptococos fecales, las líneas investigadas presentaron un buen comportamiento, se destaca el FLA 2, con un promedio de cero UFC/100 ml durante el Periodo II, resultados similares presentan el FLA 1 y 4 en el periodo IV.

La eficiencia en remoción de sólidos volátiles es baja en los filtros gruesos y en los filtros lentos en los tres periodos, acentuándose en el Periodo IV en los filtros lentos.

Parámetros como hierro y manganeso son removidos significativamente en las líneas de tratamiento, con valores mayores al 90%. Aunque el diseño de esta investigación se orientó particularmente al establecimiento del potencial de la filtración gruesa en etapas, en combinación con la tecnología de FLA, para el tratamiento del agua, antes que al establecimiento de mecanismos específicos de remoción de los contaminantes en las unidades de tratamiento, la revisión de literatura sugiere que el proceso de oxidación química del hierro puede estar jugando un papel predominante ya que el agua presenta niveles de oxígeno superiores a 5 mg/l y valores de pH cercanos a 7. La oxidación biológica se ve favorecida en condiciones de pH ácido, lo cual facilita la actividad de ferrobacterias, particularmente del género *Thiobacillus*. Sin embargo, Benitez (1988) detectó la presencia de *Thiobacillus* en las unidades de FLA de la planta a escala real el Retiro y según Ehrlich, (1981) ellos podrían estar contribuyendo en alguna medida a la remoción de hierro, a pesar del pH neutro, con base en la presencia de la enzima citocromoc que posibilita su reducción en ambientes no ácidos.

La remoción acumulada de DQO para el Periodo III es mayor de 72.6% en todos los filtros lentos, dando promedios menores de 5 mg/l O<sub>2</sub> tanto en los filtros gruesos como en los filtros lentos. En el Periodo III la remoción acumulada fue más alta en las líneas 2 y 5 con un mismo valor (58.9%), mientras que la menor remoción se presentó en la línea 1 con un valor de 54.2%. En el Periodo IV la remoción es baja para todas las líneas, sin embargo, el afluente presenta promedios por debajo de 5 mg/l O<sub>2</sub>. Esto se debe al agua cruda, que en este Periodo presenta promedios de calidad de agua más baja que en los Periodos anteriores.

La alcalinidad total bicarbonática, no es removida en el sistema aumentando ligeramente en los filtros gruesos y en los filtros lentos sin mayor alteración del equilibrio ácido carbónico-bicarbonato del agua. Así, no se presenta variación apreciable del pH el cual se mantiene ligeramente arriba de la neutralidad con algunas excepciones como el del FGAC (Periodo II) donde sube hasta 9.3 unidades, sin incidencia en la alcalinidad total. De acuerdo a lo anterior, no se reduce la capacidad buffer del agua por efecto de la actividad fotosintética de las algas, que implica aumento considerable del pH y formación de precipitados (Ellis, 1985). Esto es consecuente con el comportamiento de la dureza total, la cual tampoco es removida a través

de las unidades de investigación.

Se observa claramente que la reaeración que se sucede después de cada unidad de filtración gruesa vertical permite mantener los niveles de oxígeno disuelto. Los valores más altos se presentaron en el efluente de las líneas 1, 2, 5, mientras que en las líneas 3 y 4 el diseño de las unidades de filtración gruesa horizontal no permite esta reaeración. sin embargo, la reaeración que se da a la entrada de todas las unidades de FLA compensan este fenómeno y es así como todos los efluentes finales de las líneas de investigación presentan valores superiores a 4.9 mg/l.

A diferencia del periodo I, en el periodo II se presentó un efecto de "maduración" en las unidades de filtración lenta, como se presenta en la Figura 11.12 para el FLA de la línea 1. Así, durante el periodo comprendido entre enero 23 y febrero 11 de 1991, el cual representa los primeros 19 días de funcionamiento, la calidad microbiológica del agua producida por estas unidades presentó niveles de contaminación por enzima de 10 UFC/100 ml, sin embargo después de este periodo, el efluente presentó consistentemente niveles bajos de contaminación microbiológica. Este comportamiento es importante tenerlo en cuenta ya que para este periodo en particular, se requiere la aplicación de la desinfección como parte integral del tratamiento y no como barrera de seguridad, por lo tanto las medidas de vigilancia y control de la calidad del agua así como la operación del sistema deben ser aplicadas rigurosamente.

Los mejores resultados obtenidos en los efluentes de las unidades de FLA durante los tres últimos periodos de la investigación, de una parte al mejoramiento de la calidad del agua cruda, y de otra parte al mejor comportamiento de los sistemas de pretratamiento, los cuales mejoraron la calidad afluente a los FLA, presentándose mucho mas cerca a los valores idealmente recomendados en la literatura (ver Tabla 2.3), por lo cual las unidades pueden trabajar bajo condiciones mas favorables para el desarrollo de su actividad bioquímica.

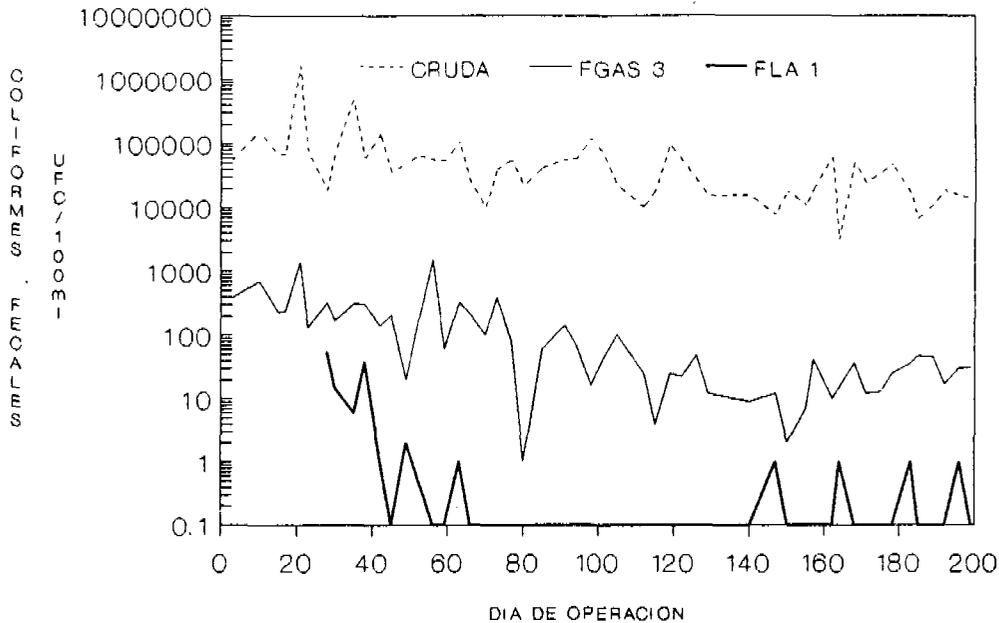
El comportamiento hidráulico de las líneas de pretratamiento y filtración lenta en arena en los parámetros duración de carrera y pérdida de carga se presenta en la Tabla 11.15, en la cual se aprecia la diferencia en estos parámetros con respecto al Periodo I, especialmente en la pérdida de carga de las primeras unidades de pretratamiento. A diferencia del Periodo I, el FGDS 1 presentó la menor pérdida de carga máxima, 1.2, 3.9 y 5.7 cm; seguido por FGAS 1 con 3.0, 5.7 y 10.4 cm. En el FGHM fue de 5.9 cm, mientras que en el FGH, que no tuvo mantenimiento, fue de 7.2 cm.

TABLA 11.15 Duración de carrera y pérdida de carga hidráulica. Líneas de tratamiento. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III, IV.

PERIODO	PARAMETRO		FGAS1	FGAS2	FGAS3	FLA1	FGAC1	FLA2	FGHM1	FLA3	FGH1 (-)	FLA4	FGDS1	FGDS2	FGDS3	FLA5
II	Duración de carrera (días)	Promedio	30	31	31	43	30	29	30	41		51	30	31	30	55
		Mínima	28	29	29	27	28	18	27	31		40	27	29	28	42
		Máxima	31	33	32	75	33	52	34	52		72	31	33	32	69
		N.C	6	6	6	4	6	6	6	4		3	6	6	6	3
	P. Carga (cm)	Mínima	0.3	0.3	0.2	4.2	0.4	3.9	0.3	4.1		0.2	4.2	0.1	0.2	0.3
	Máxima	3.0	3.4	1.3	80.0	7.5	80.0	1.9	80.0		1.5	80.0	1.2	0.9	1.2	80.0
III	Duración de carrera (días)	Promedio	31	31	31	35	31	23	30	30		48	30	31	31	41
		Mínima	30	30	30	28	30	17	30	25		39	30	30	30	37
		Máxima	35	35	35	46	35	32	35	34		54	35	35	35	48
		N.C	6	6	6	5	6	8	6	6		4	6	5	5	4
	P. Carga (cm)	Mínima	1.0	0.4	0.6	7.5	2.6	4.9	0.7	4.9		0.8	7.2	0.4	0.8	1.4
	Máxima	5.7	1.3	2.9	80.0	8.6	80.8	6.0	80.0		2.8	80.0	3.9	1.5	3.7	80.0
IV	Duración de carrera (días)	Promedio	30	30	30	28	30	27	30	29		34	30	30	30	33
		Mínima	30	30	30	23	30	23	30	22		30	30	30	30	28
		Máxima	30	30	30	32	30	37	30	40		37	30	30	30	45
		N.C	6	6	6	7	6	8	6	6		6	6	6	6	5
	P. Carga (cm)	Mínima	1.3	0.4	1.5	9.6	3.6	7.5	0.9	6.3		2.8	10.3	0.7	1.7	3.3
	Máxima	37.0	7.9	6.9	80.0	29.9	80.0	5.9	80.0		7.5	80.0	5.7	2.0	7.3	80.0

(-) No se lavó

P. Carga : Pérdida de Carga hidráulica



**FIGURA 11.12 Coliformes fecales (UFC/100 ml). Plantas Piloto. Línea con FGAS. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.**

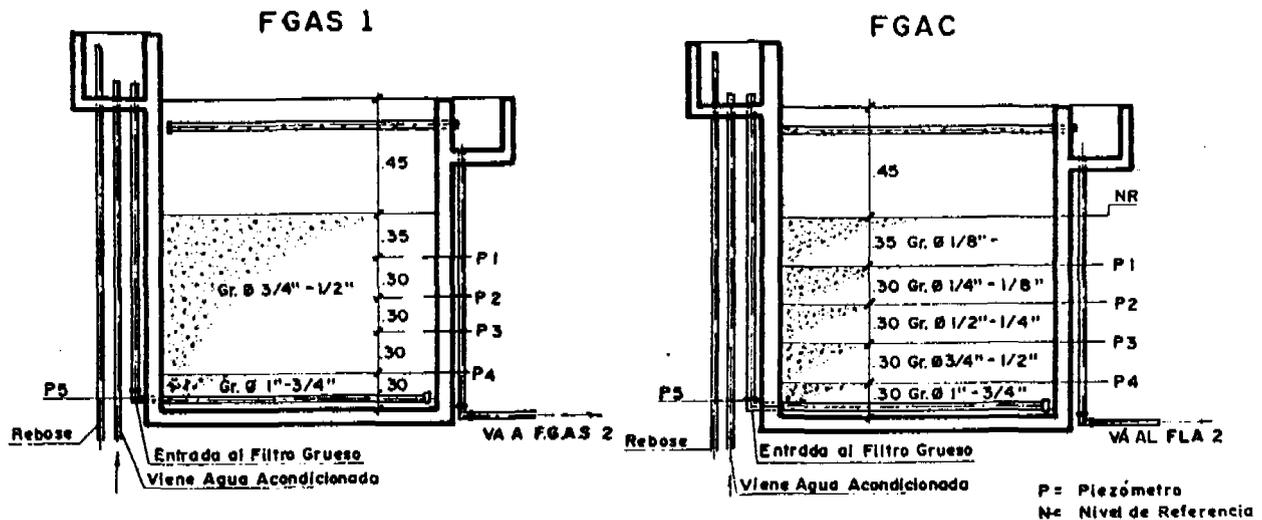
Esto es debido principalmente a dos factores : disminución en la velocidad de filtración durante los Periodos II y III y al efecto de la calidad de agua suministradas por los filtros gruesos dinámicos, los cuales como ya se mencionó previamente, mostraron una gran capacidad en la remoción de sólidos suspendidos. Durante el Periodo IV donde la velocidad de filtración es igual a la del Periodo I, los valores de pérdida de carga también fueron inferiores, lo cual certifica el potencial del uso de los filtros gruesos dinámicos como primera etapa en un sistema de pretratamiento con filtración gruesa.

Es interesante poner de manifiesto que estas pérdidas de carga menores se presentaron a pesar de que se introdujeron cambios con respecto al Periodo I en variables de diseño y de operación y mantenimiento que están relacionadas directamente con este parámetro, como son :

- Lechos filtrantes más finos y de mayor longitud
- Frecuencias de lavado menores (30 días)
- Operación continua sin extracción del material filtrante para el lavado total (19 meses)

La localización de los piezómetros instalados para registrar la pérdida de carga hidráulica en los lechos filtrantes del FGAS 1 y FGAC se presentan en la Figura 11.13, y en las 11.14 y 11.15 los datos para las carreras No. 6 (última del Periodo II) y No. 19 (última del Periodo IV)

con sus correspondientes porcentajes de acumulación de pérdida de carga en el lecho filtrante en cada una de estas figuras. En cada una de estas Figuras, el valor del piezómetro P5 indica la energía potencial disponible a la entrada de la unidad.



**FIGURA 11.13** Piezómetros en el lecho filtrante de FGAS 1 Y FGAC. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.

Con velocidad de 0.30 m/h (Periodo II), la pérdida de carga en los filtros gruesos se da en el fondo y luego se manifiesta también en la superficie. Al final de la carrera, como es de esperarse, hay mayor pérdida de carga en la superficie de contacto con el agua; así en las unidades de flujo ascendente, la mayor pérdida de carga se desarrolla en la parte inferior y en las de flujo descendente, en la superficie.

Los porcentajes de acumulación de pérdida de carga en este mismo periodo estuvieron del orden del 56% en el fondo del lecho y del 26% en la superficie en el FGAC y FGAS 1, y del 48% en la superficie y 26% en el fondo del lecho del FGDS 1.

En el Periodo IV, como puede observarse en la Figura 11.15, la pérdida de carga en el FGAS 1, se desarrolla casi toda en el fondo, con un porcentaje del 86%, desde el inicio de la carrera y del 2% en la superficie. En el FGDS 1, en las capas superiores es del 50% aproximadamente, que comprende las lecturas de los piezómetros 3, 4 y 5 y del 27% en el fondo. En contraste, y como puede observarse también en la Figura 11.15. en el FGAC, la pérdida de carga se

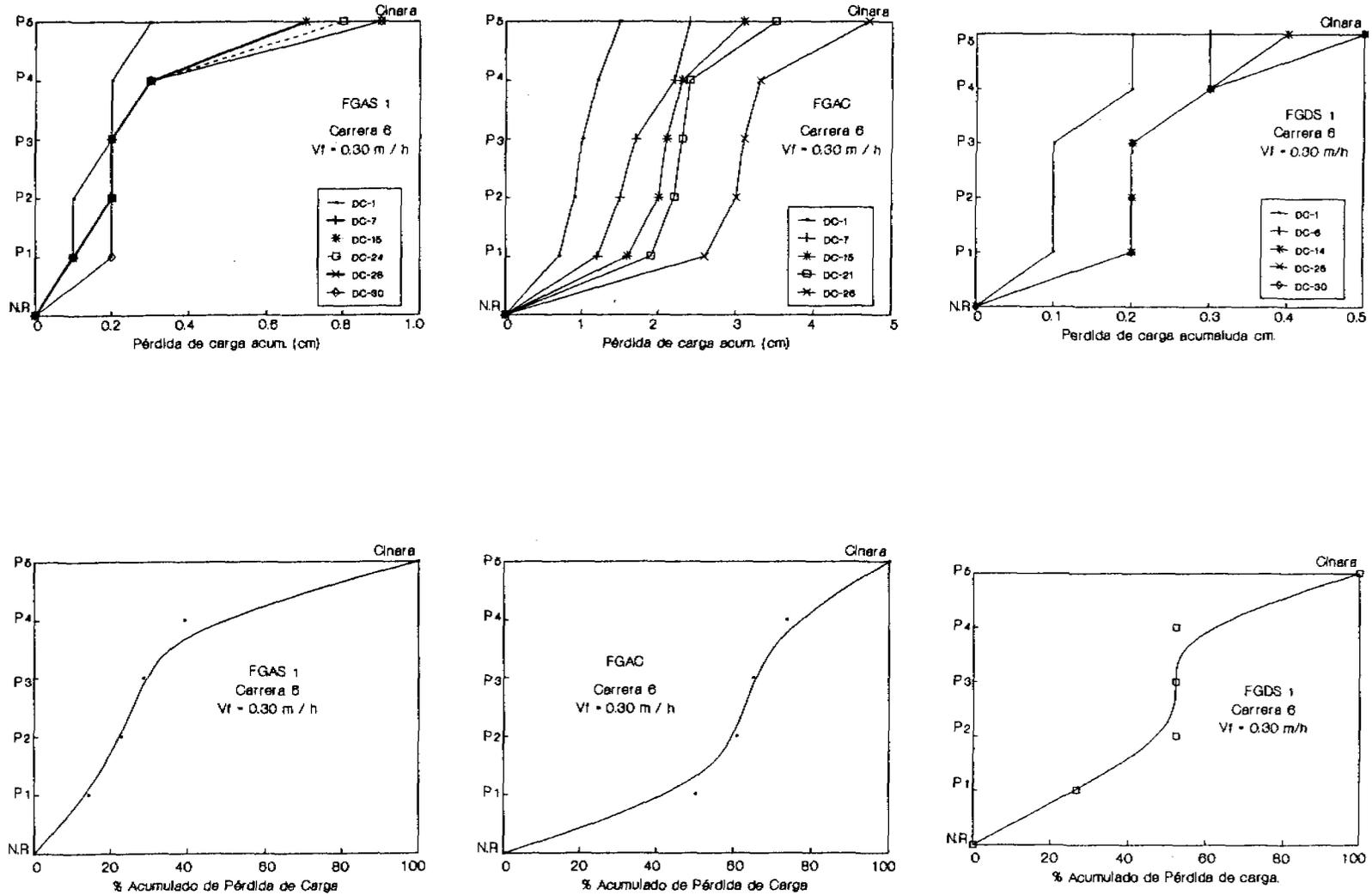


FIGURA 11.14 Pérdida de Carga (cm) y porcentaje de Acumulación de la Pérdida de carga en las primeras etapas de los filtros gruesos. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.

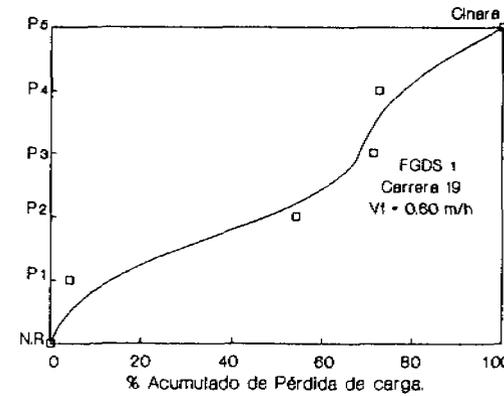
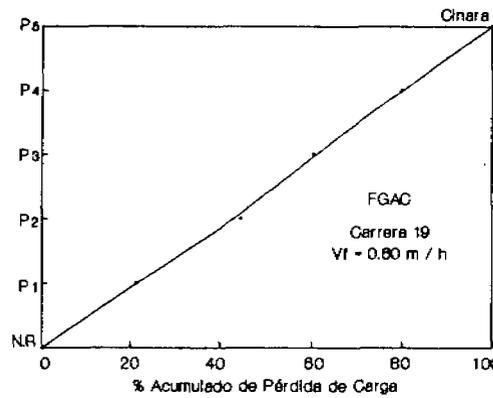
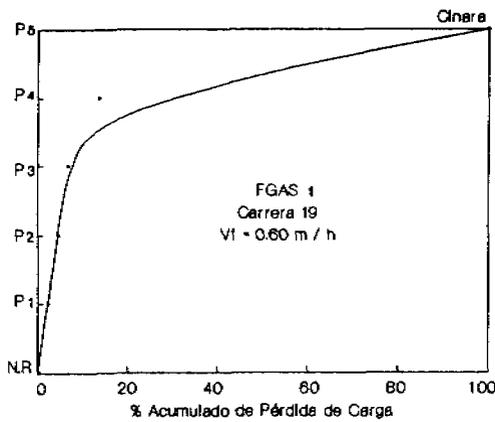
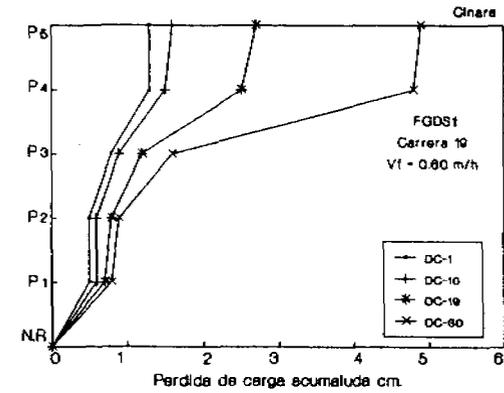
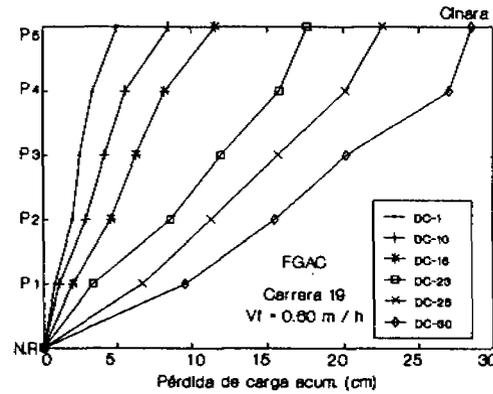
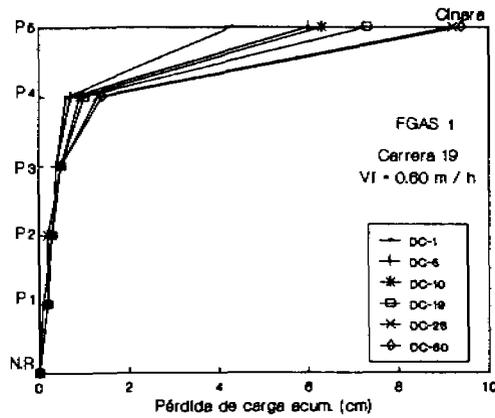
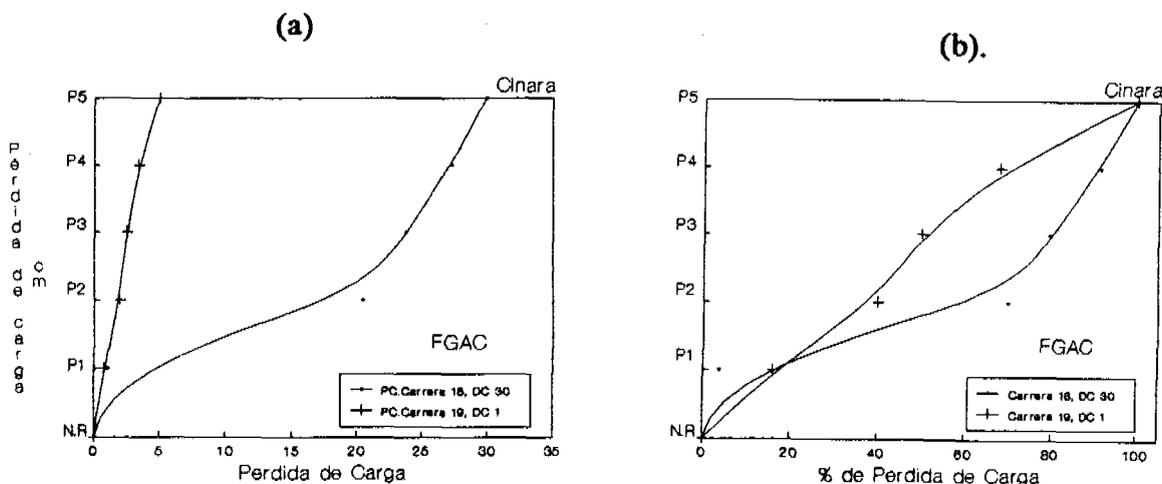


FIGURA 11.15 Pérdida de Carga (cm) y porcentaje de Acumulación de la Pérdida de carga en las primeras etapas de los filtros gruesos. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.

distribuye en todo el lecho filtrante. Esto es típico de un filtro a profundidad, con la ventaja de un aprovechamiento de todo el lecho de grava al finalizar la carrera.

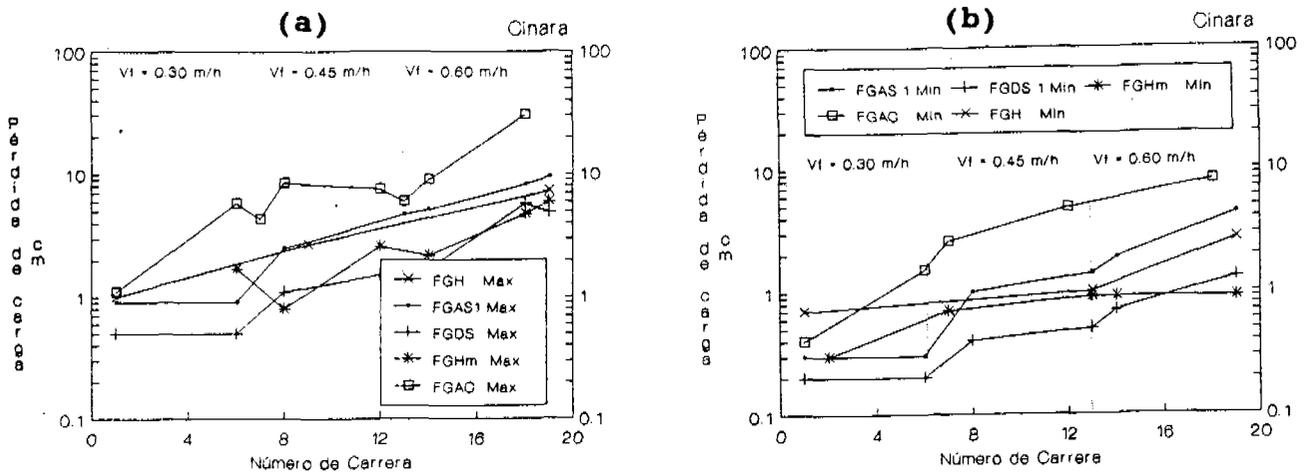
Durante el lavado, la pérdida de carga acumulada en toda la unidad, es recuperada durante el lavado superficial y de fondo que se realiza, como puede observarse en la Figura 11.16 a y b, de pérdida de carga antes y después del lavado del FGAC con sus correspondientes porcentajes de acumulación.



**FIGURA 11.16** Porcentaje de Pérdida de carga antes y después del lavado. FGAC. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.

Antes del lavado, ésta se acumula en el fondo y superficie del lecho filtrante y después de él, desciende en esos sitios distribuyéndose casi uniformemente en todo el lecho. El lavado superficial restablece el 67% la carga hidráulica perdida, pasando de 43% antes del lavado a 18% después de él, mientras que la descarga de fondo aparentemente no recupera la carga perdida.

La variación de la pérdida de carga mínima y máxima por carrera en cada periodo para los primeros compartimientos de los filtros gruesos, se presenta en la Figura 11.17, las cuales corresponden a la pérdida de carga antes y después de lavado. Claramente se observa el aumento de la pérdida de carga tanto mínima como máxima en el tiempo, siendo mayores como es de esperarse de el periodo IV en que operan con mayor velocidad.



**FIGURA 11.17** Pérdida de carga máxima (a) y mínima (b). Primeras etapas de Pretratamiento, Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV

Este comportamiento está indicando que la acumulación de sólidos se incrementa tanto que con la frecuencia y manera de lavar las unidades, no es suficiente para que haya recuperación de la carga hidráulica perdida. Notese el incremento de la pérdida de carga mínima (después de lavado) en el tiempo. Además, que bajo estas condiciones de operación y mantenimiento, podría llegar a haber un consumo total de la carga hidráulica disponible. Es necesario, por lo tanto, implementar y/o desarrollar alternativas de operación y mantenimiento que reduzcan ese efecto mostrado.

En cuanto al comportamiento hidráulico de los filtros lentos de arena, en la Tabla 11.15 se observa que la duración de sus carreras aumentó con respecto al Periodo I, siendo mayores en el Periodo II, esto es debido a la disminución en la velocidad de filtración en los FLA a 0.1 m/h y a la remoción obtenida en los filtros gruesos, brindando una mejor calidad de agua a los FLA. En el período III se cuenta con carreras más cortas porque la velocidad de filtración se aumenta hasta 0.15 m/h. El Periodo IV de nuevo muestra carreras más cortas aparentemente porque ha habido una acumulación de sólidos en los lechos filtrantes a través del tiempo como lo muestran los resultados del silt test (Ver Anexo 7).

Una relación de la duración de carrera de los FLA y el contenido de sólidos suspendidos afluente, se presenta en la Figura 11.18 (a) y (b). Una vez más a mayor concentración de sólidos suspendidos afluente al FLA, la duración de las carreras es menor.

Un esquema de la ubicación de los piezómetros para medir la pérdida de carga en el lecho filtrante, se presenta en la Figura 11.19.

En cuanto a la variación de la pérdida en los FLA, ésta fue condicionada a un valor máximo de 80cm. Es interesante mostrar el comportamiento de esa pérdida de carga a través del lecho (Figura 11.20). En los FLA, al igual que en los filtros gruesos se observa claramente el incremento en la pérdida de carga mínima con el transcurso de la operación del FLA; además, la mayor pérdida de carga se concentra en la superficie del lecho filtrante lo cual guarda relación con el desarrollo de la capa biológica y subsecuente colmatación del lecho filtrante, principales responsables de la eficiencia del filtro, mientras que en los niveles inferiores del lecho estas pérdidas de carga son más pequeñas.

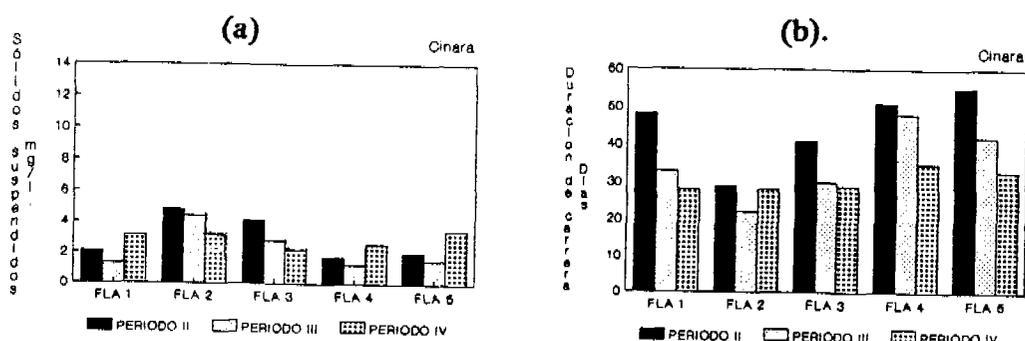


FIGURA 11.18 Sólidos suspendidos en el afluente de los FLA (a) y carreras de filtración de los FLA (b). Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III, IV.

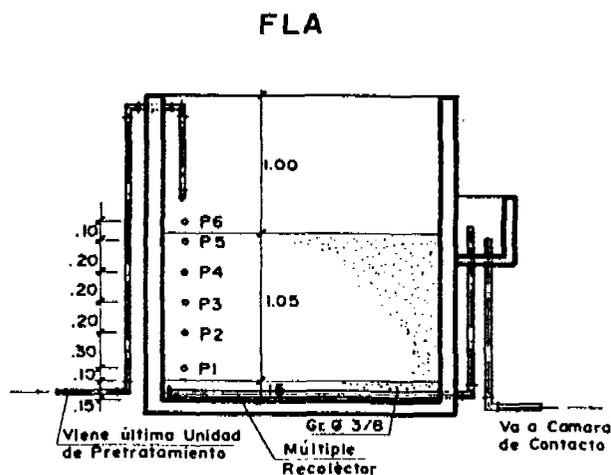
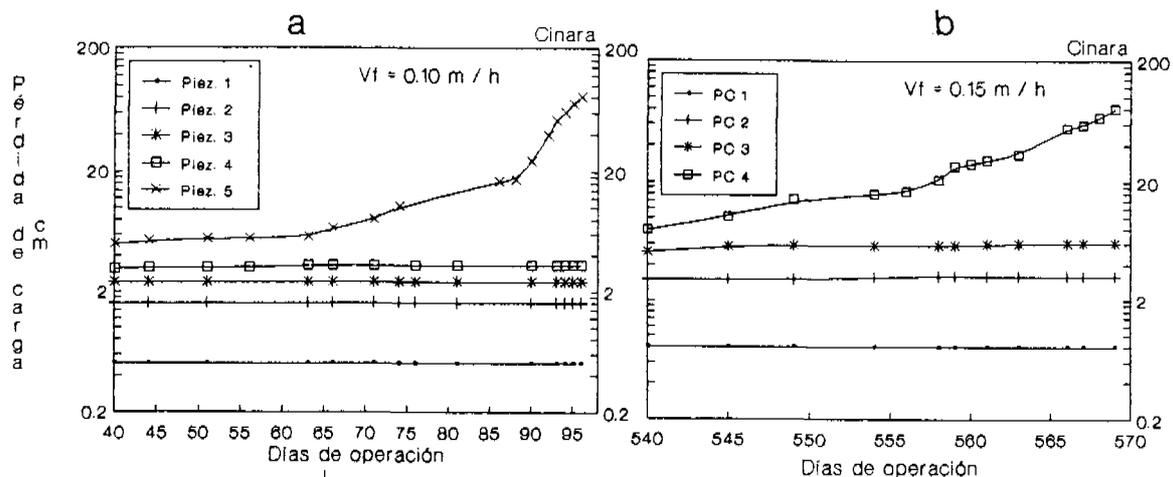


FIGURA 11.19 Piezómetros en el lecho filtrante de los FLA. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III y IV.



**FIGURA 11.20 Pérdida de carga en el lecho filtrante del FLA 1. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II y III**

## 11.2 PLANTAS A ESCALA REAL

### 11.2.1 Agua Cruda

Las fuentes de abastecimiento de las plantas a escala real seleccionadas, así como, la correspondencia a las unidades de prueba en la Estación de Investigación, presenta características particulares en su calidad y en el comportamiento mismo de la fuente.

#### - Río Pance

El río Pance es la fuente de abastecimiento de las plantas de tratamiento del Colegio Colombo Británico, Universidad Javeriana, y parcelaciones: el Retiro y Cañas Gordas.

En la parte alta, el río presenta aguas claras por disponer de una buena cobertura vegetal en esta zona de la cuenca. En la zona media, las riberas del río han constituido tradicionalmente un sitio de recreación, especialmente durante los fines de semana y días festivos. En esta zona,

también se presentan algunas descargas de efluentes de minas de carbón.

Después de esta zona, se realizan derivaciones al río que tienen como fin, el abastecimiento de agua para pequeños núcleos y el riego de jardines, entre otros. Estas derivaciones son receptoras de desechos domésticos algunas en mayor grado que las otras, es así como la derivación del Colombo Británico, presenta valores promedio de 26854 UFC/100 ml, en coliformes fecales, alcanzando valores máximos hasta 222000 UFC/100 ml. Las otras derivaciones presentan promedios al rededor de 6500 UFC/100 ml.

Los resultados físico-químicos presentan mejores condiciones que las encontradas en el río Cauca. Con una temperatura promedio de 22°C y una variación de pH entre 6.3 y 8.1 unidades, el río Pance en sus derivaciones presenta valores promedio de turbiedades entre 10 y 18 UNT, sólidos suspendidos entre 9.5 y 14 mg/l y color real entre 19 y 23 UPC.

Los valores de hierro total y manganeso encontrados en esta fuente oscilan entre 0.2 y 9.0 mg/l y entre 0.12 y 0.18 mg/l respectivamente.

Los valores de DQO, fueron en general bajos con promedios menores de 10.9 mg/l de O<sub>2</sub>, y el oxígeno disuelto se mantuvo al rededor de 6.8 mg/l.

#### **- Río Morales y Quebradas la Elvira y Calimita**

Estas tres fuentes, se analizan conjuntamente, por presentar características similares en su comportamiento y calidad de agua.

El río Morales es la fuente de agua que abastece a la planta la Marina, la quebrada la Elvira, sirve como fuente de abastecimiento en el corregimiento de Ceylán y la quebrada Calimita a la planta de tratamiento de la concentración escolar de Retrepo (CIDER).

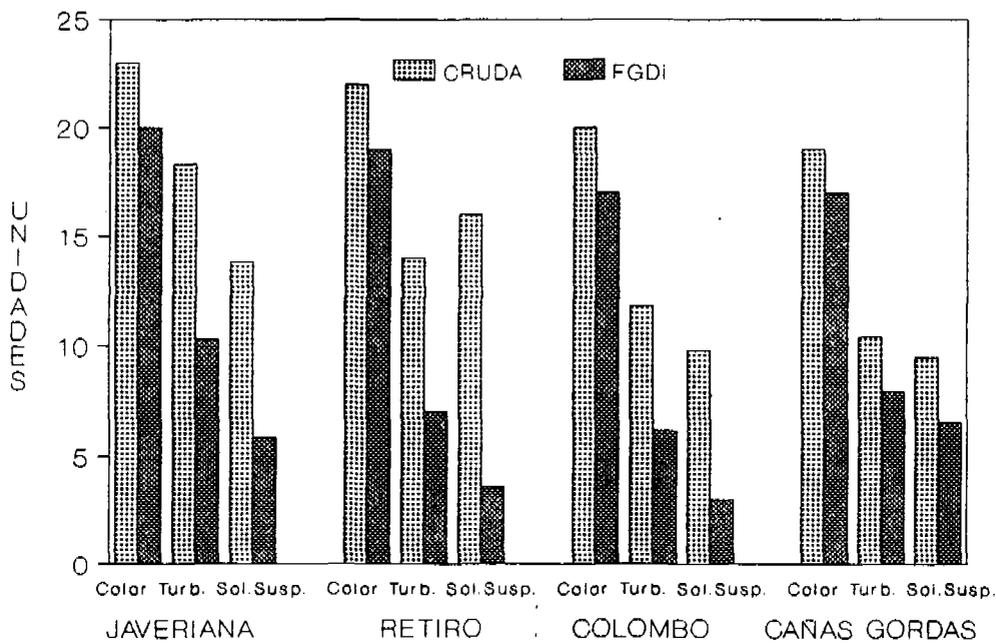
De las fuentes evaluadas, estas tres presentan los valores menos críticos tanto en los parámetros físico-químicos como en los microbiológicos.

Los promedios de turbiedad en esta fuentes estuvieron entre 2.5 y 7.2 UNT, y los de sólidos suspendidos entre 2.4 y 4.5 mg/l. Los promedios de color real, estuvieron en el rango de 5 a 11 UPC, mientras que los coliformes fecales no superaron los 1000 UFC/100 ml como promedio.

### 11.2.2 Plantas de tratamiento con FGD<sub>i</sub>

Las plantas de tratamiento de la Universidad Javeriana, Colegio Colombo Británico y Parcelación Cañas Gordas fueron diseñadas con FGD<sub>i</sub> como primera barrera de tratamiento. Los alentadores resultados no sólo de calidad de agua producida por estos FGD<sub>i</sub>, sino también en la optimización de las labores de mantenimiento de los filtros gruesos de estas plantas, fueron conocidos por los miembros de la junta administradora de la planta de El Retiro, suscitando en ellos interés en construir una unidad de esas características. Así, en octubre de 1991, el sedimentador simple de esta planta fue convertido en un FGD<sub>i</sub>.

El valor promedio más bajo de sólidos suspendidos en el efluente del FGD<sub>i</sub> lo presentó la planta del Colombo con 3.0 mg/l y el más alto, la de Cañas Gordas con 6.6 mg/l, mientras que en coliformes fecales, el valor más alto se presentó en el Colombo (6861 UFC/100 ml) y el más bajo en el Retiro (3629 UFC/100 ml). Para mayor información ver la Figura 11.21 y la Tabla 11.16.



**FIGURA 11.21** Promedio de parámetros evaluados en las unidades de Acondicionamiento. Plantas a escala real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Oct 1990 - Julio 1992.

TABLA 11.16 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en Las Unidades de Acondicionamiento. Plantas a escala real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	U. JAVERIANA		C. COLOMBO B.		PARCELACION EL RETIRO				P. CAÑAS GORDAS	
		CRUDA	FGDi	CRUDA	FGDi	CRUDA	SED. SIMP. (*)	CRUDA	FGDi (**)	CRUDA	FGDi
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	14	5.9	9.8	3.0	9.3	8.3	16	3.6	9.5	6.6
	Desviación	21	7.9	22	5.3	11	12	50	6.3	19	16
	Mínimo	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.1	0.0
	Máximo	150	43	158	45	46	64	316	37	126	105
	No. Datos	93	92	91	91	54	48	40	40	52	51
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	18	10	12	6.2	14	12	14	7.1	10	8.0
	Desviación	15	7.8	15	7.8	23	19	18	7.4	10	5.7
	Mínimo	4.9	3.2	2.8	1.8	4.0	3.0	3.5	2.1	3.4	2.9
	Máximo	112	55	100	62	180	150	110	38	75	33
	No. Datos	124	121	123	123	87	69	40	40	85	84
COLOR REAL (UPC)	Promedio	23	20	20	17	19	17	22	19	19	17
	Desviación	13	10	15	13	15	13	10	10	12	11
	Mínimo	5	6	4	2	4	2	7	3	5	5
	Máximo	96	67	108	96	100	70	56	53	51	50
	No. Datos	124	121	123	123	87	69	40	40	85	85
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	6816	3629	26854	6861	7627	5065	3978	1451	6269	4099
	Desviación	12422	6518	33914	7408	24829	9032	4867	1961	13641	8007
	Mínimo	310	210	800	160	240	220	473	120	260	210
	Máximo	98000	59000	228000	54000	222000	62800	23700	10200	100000	57000
	No. Datos	121	119	119	118	86	66	40	40	84	82
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100mL)	Promedio	3513	1965	11242	2540	2222	1160	2455	926	3242	2904
	Desviación	3860	1963	33268	3082	3782	1140	2095	376	9784	9577
	Mínimo	300	100	760	160	104	72	1055	400	250	130
	Máximo	18400	9100	192000	15400	16800	4100	8100	1500	50800	50600
	No. Datos	30	29	31	31	19	18	9	9	25	26

(\*) Octubre de 1990 a Septiembre de 1991.

(\*\*) Octubre de 1991 a Julio de 1992.

En la planta El Retiro, se puede apreciar el efecto que sobre la calidad ocasionó el FGD<sub>i</sub>, pues cuando se tenía sedimentador simple como acondicionador, los sólidos suspendidos pasaron de 9.3 mg/l en el agua cruda a 8.3 en el efluente sedimentador; mientras que con el FGD<sub>i</sub>, pasó de 16 mg/l en el agua cruda a 3.6 mg/l en el efluente del FGD<sub>i</sub>. Esto se verifica más ampliamente con los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, color real y coliformes fecales presentados en las Tablas de remoción de todas las plantas a escala real que posteriormente se presentarán. Estas eficiencias fueron del 77% en sólidos suspendidos, del 49% en turbiedad y del 66% en coliformes fecales.

El FGD<sub>i</sub> del colegio Colombo Británico presentó las mejores remociones en estos parámetros. A excepción del de Cañas Gordas donde la velocidad de filtración es alrededor de 9.0 m/h, los demás sistemas, donde las velocidades de filtración son menores de 2.0 m/h, presentan remociones superiores al 55% en sólidos suspendidos y al 47% en coliformes fecales. Al igual que los FGD<sub>i</sub> de las plantas piloto, la remoción de color real es inferior al 15%.

### 11.2.3 Plantas de tratamiento con FGAS

Las plantas que poseen FGAS como sistema de pretratamiento son: Cañas Gordas, La Marina y Ceylán.

Como se observa en la Tabla 11.17 y en la Figura 11.22, el agua tratada cumple con todas las especificaciones de calidad de agua para consumo humano. Así mismo, la calidad efluente de los sistemas de pretratamiento es apta para ser tratada por FLA, según los reportes de la literatura, presentados en la Tabla 2.2.

El oxígeno fue similar en los filtros gruesos de estas plantas, con valores promedio 6.9 mg/l mientras que en los FLA, el valor más alto (6.8 mg/l) se presentó en Ceylán, y el más bajo (5.2 mg/l) en Cañas Gordas. La materia orgánica presente es baja, lo cual guarda relación con los valores bajos en el afluente.

En las plantas con FGAS, las mejores eficiencias en los filtros gruesos en la remoción de los parámetros físicos las presentó la planta de tratamiento de Ceylán con 92% en sólidos suspendidos, 72% en turbiedad y 20% en color real, mientras que la mejor remoción en coliformes fecales la presentó la de Cañas Gordas con 94.2% (Ver Tablas de remociones al final del capítulo 11). Los filtros gruesos de la Marina presentan las eficiencias más bajas, lo cual guarda relación con la velocidad de operación de los filtros gruesos, superior a la de Ceylán y Cañas Gordas (ver Tabla 11.18). La calidad efluente de los filtros gruesos afecta la carrera de los FLA. Así, en Ceylán, donde se presentan las mejores eficiencias, la duración promedio de las carreras de filtración de los FLA oscilan entre 111 y 205 días, mientras que en la Marina, se presentaron entre 49 y 86 días, adicionalmente se presentó una gran proliferación de algas

TABLA 11.17 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGAS. Plantas a escala real Parcelación Cañas Gordas, La Marina y Ceylán. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	PARCELACION CAÑAS GORDAS				LA MARINA			CEYLAN		
		CRUDA	FGDi	FGAS	FLA	CRUDA	FGAS	FLA	CRUDA	FGAS	FLA
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	9.5	6.6	2.5	0.1	4.5	1.4	0.3	2.4	0.2	0.1
	Desviación	19	16	7.7	0.3	7.9	3.7	0.5	2.1	0.3	0.1
	Mínimo	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Máximo	126	105	54	1.4	55	27	3.2	8.0	1.3	0.5
	No. Datos	52	51	50	52	53	52	52	53	53	53
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	10	8.0	4.6	0.8	5.2	2.6	1.0	2.5	0.7	0.4
	Desviación	10	5.7	4.7	0.5	8.5	4.0	0.7	0.6	0.3	0.1
	Mínimo	3.4	2.9	1.9	0.3	1.0	0.4	0.4	0.6	0.3	0.2
	Máximo	75	33	27	2.6	64	30	5.0	4.6	2.0	0.8
	No. Datos	85	84	79	84	82	79	80	83	79	82
COLOR REAL (UPC)	Promedio	19	17	14	3	6	4	2	5	4	2
	Desviación	12	11	11	2	6	5	2	3	3	2
	Mínimo	5	5	1	1	1	1	1	1	1	0
	Máximo	51	50	58	8	34	32	15	16	16	8
	No. Datos	85	85	82	80	82	82	80	83	83	82
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	6269	4099	364	0.9	565	126	1.2	368	46	0.6
	Desviación	13641	8007	520	2.1	549	108	2.2	397	41	1.6
	Mínimo	260	210	14	0	30	0	0	46	4	0
	Máximo	100000	57000	3350	11	3500	672	11	2700	312	11
	No. Datos	84	82	79	83	80	78	77	81	83	81
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100mL)	Promedio	3242	2904	127	0.7	453	64	0.9	1085	124	0.5
	Desviación	9784	9577	79	2.1	1046	45	1.0	816	66	1.1
	Mínimo	250	130	12	0	38	14	0	196	25	0
	Máximo	50800	50600	348	11	6000	224	3	4200	350	5
	No. Datos	25	26	25	26	30	30	30	28	26	28

TABLA 11.17 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGAS. Plantas a escala real Parcelación Cañas Gordas, La Marina y Ceylán. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992. (Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	PARCELACION CAÑAS GORDAS				LA MARINA			CEYLAN		
		CRUDA	FGDi	FGAS	FLA	CRUDA	FGAS	FLA	CRUDA	FGAS	FLA
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	57	48	43	41	123	108	104	98	92	95
	Desviación	11	16	14	12	16	12	13	22	25	17
	Mínimo	40	20	26	17	96	84	72	26	8	60
	Máximo	75	89	82	60	167	135	128	123	128	131
	No. Datos	18	18	18	18	19	19	19	20	20	20
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	25	18	17	16	41	33	31	34	30	29
	Desviación	9	9	7	8	13	15	17	14	13	12
	Mínimo	10	5	3	5	13	6	3	4	4	4
	Máximo	47	33	32	34	65	70	68	54	58	48
	No. Datos	17	17	17	17	17	17	16	18	18	18
D.Q.O. (mg/L O2)	Promedio	< 11.2	< 7.8	< 6.6	< 5.1	< 5.9	< 5.2	< 5.0	< 6.6	< 5.4	< 5.0
	Desviación	8.9	3.7	2.7	0.2	2.0	0.7	0.1	2.4	1.1	0.0
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	40.2	16.0	13.5	6.0	13.6	8.0	5.6	13.2	8.8	5.0
	No. Datos	17	17	17	16	19	18	17	21	21	20
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	0.74	0.68	< 0.27	< 0.09	0.51	< 0.13	< 0.07	0.26	< 0.12	< 0.05
	Desviación	0.37	0.39	0.22	0.15	0.57	0.11	0.08	0.20	0.16	0.05
	Mínimo	0.20	0.20	0.01	0.01	0.10	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
	Máximo	1.42	1.50	0.85	0.67	2.59	0.36	0.30	0.76	0.70	0.16
	No. Datos	18	17	18	18	20	20	20	21	20	20
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.12	0.10	< 0.05	< 0.03	0.08	< 0.04	< 0.03	0.08	< 0.04	< 0.03
	Desviación	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04
	Mínimo	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.20	0.20	0.10	0.20	0.19	0.18	0.16	0.16	0.12	0.18
	No. Datos	18	17	18	18	20	19	19	21	21	21

TABLA 11.17 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGAS. Plantas a escala real Parcelación Cañas Gordas, La Marina y Ceylán. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992. (Continuación).

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	PARCELACION CAÑAS GORDAS				LA MARINA			CEYLAN		
		CRUDA	FGDi	FGAS	FLA	CRUDA	FGAS	FLA	CRUDA	FGAS	FLA
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	6.9	6.9	7.1	5.2	7.4	7.0	6.4	7.2	6.9	6.8
	Desviación	0.6	0.8	0.8	1.3	1.0	1.0	2.0	0.9	0.8	1.3
	Mínimo	5.5	3.8	4.5	3.2	3.5	3.6	4.1	4.4	5.1	4.2
	Máximo	7.8	7.9	8.1	8.3	9.5	8.3	13.9	10.4	9.6	9.5
	No. Datos	25	24	24	23	32	30	26	30	30	32
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Promedio	15		14	18	62	61	63	37	37	39
	Desviación	3		3	3	10	8	9	5	6	6
	Mínimo	12		12	13	45	48	42	20	20	21
	Máximo	21		21	24	82	77	79	44	45	46
	No. Datos	17		17	15	20	20	16	21	21	21
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Promedio	12		12	17	60	61	64	40	38	41
	Desviación	4		4	4	16	17	16	15	11	11
	Mínimo	8		7	11	35	32	38	21	20	21
	Máximo	25		22	29	88	89	89	78	54	53
	No. Datos	17		17	15	20	20	16	21	21	21
pH (Unidades)	Mínimo	6.8	6.6	6.4	6.8	7.2	7.1	7.6	6.8	7.1	7.3
	Máximo	7.9	7.7	8.5	8.6	9.0	9.0	9.3	8.5	8.3	8.3
	No. Datos	30	18	28	21	33	32	25	30	30	25
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	21.3		22.7	22.2	18.4	18.4		19.8	19.7	19.7
	Desviación	2.5		1.6	2.4	1.4	1.4		0.9	1.0	1.3
	Mínimo	18.0		21.0	18.0	16.0	16.0		17.0	18.0	18.7
	Máximo	27.0		26.0	26.0	21.1	21.0		22.0	22.0	22.0
	No. Datos	29		10	8	31	12		25	12	5

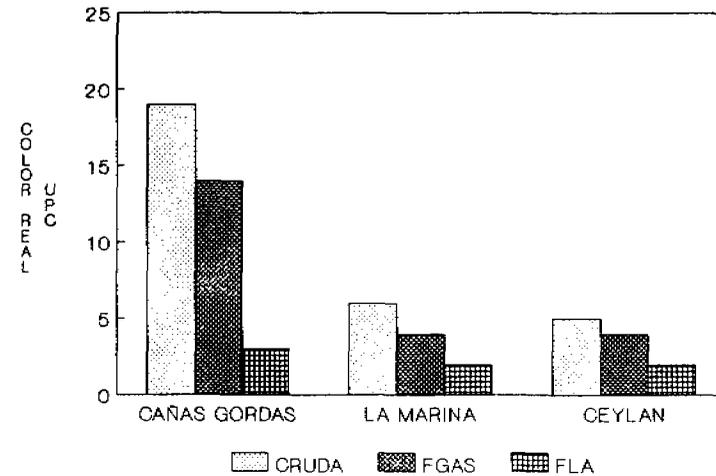
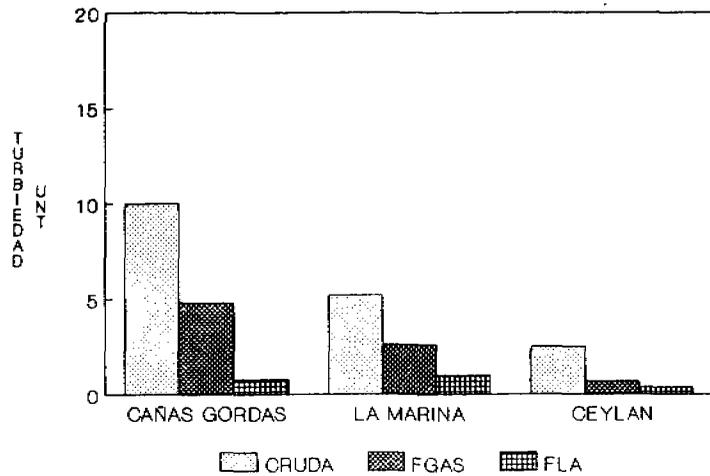
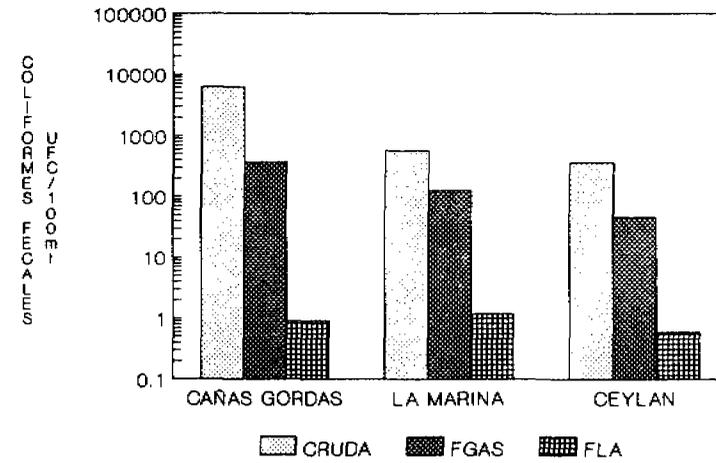
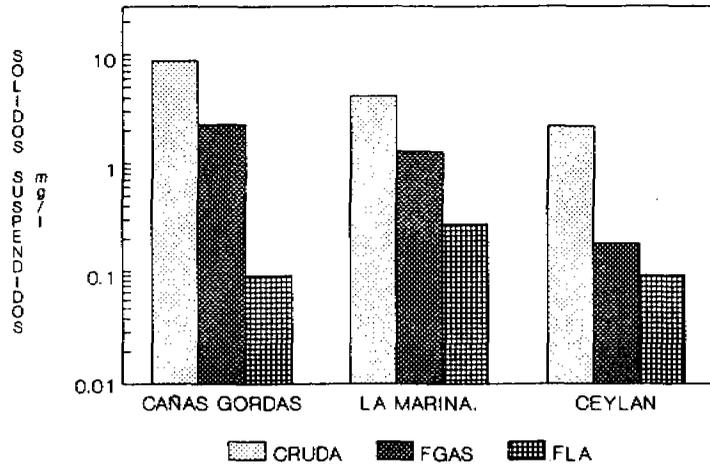


FIGURA 11.22 Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad, y Color Real. Plantas a Escala Real con FGAS, Proyecto PRETRATAMIENTOS.

TABLA 11.18 Parámetros hidráulicos en Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo Octubre 1990 a Julio de 1991.

PLANTA	UNIDAD	VT (m/h)				DURACION DE CARRERA (Días)			P. CARGA (cat)	
		Promedio	Mínimo	Máximo	No. de	Prom.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx
PARCELACION CAÑAS-GORDAS	FGDi					8	1	25	(1)	
	FGAS-A	0.64	0.06	0.76	78	6	3	12	1.1	23.8
	FGAS-B	0.63	0.06	0.84	78	7	2	18	1.1	26.0
	FLA-A	0.22	0.09	0.03	80	73	42	104	10.5	55.5
	FLA-B	0.24	0.13	0.27	80	86	71	118	12.4	73.6
	FLA-C	0.13	0.03	0.28	80	49	24	69	5.0	55.9
LA MARINA	FGAS-A	0.94	0.64	1.05	75	9	5	17	1.0	16.3
	FGAS-B	0.97	0.69	1.67	73	10	5	17	1.8	21.1
	FLA-A	0.15	0.01	0.26	73	35	16	72	1.3	73.0
	FLA-B	0.16	0.01	0.32	74	45	19	93	12.6	74.0
CEYLAN	FGAS-A	0.68	0.51	1.12	75	8	5	12	1.8	10.5
	FGAS-B	0.74	0.51	1.23	75	8	5	12	2.2	14.6
	FLA-A	0.14	0.08	0.26	73	111	111	111	5.5	70.0
	FLA-B	0.14	0.08	0.19	72	195	182	205	3.9	79.3
COLEGIO COLOMBO BRITANICO	FGDi	1.00	0.23	1.47	35	8	3	13	(1)	(1)
	FGAC	0.55	0.13	0.74	80	9	4	27	10.5	12.9
	FLA-A	0.09	0.03	0.14	83	87	23	107	3.0	27.3
	FLA-B	0.10	0.01	0.30	83	94	74	123	2.0	35.0
PARCELACION EL RETIRO	FGAC-A	0.93	0.34	1.77	83	(2)	1	20	1.0	40.7
	FGAC-B	0.86	0.30	1.62	84	(2)	1	20	1.3	39.6
	FGAC-C	0.78	0.16	1.32	83	(2)		20	2.5	39.7
	FLA-A	0.16	0.002	0.23	91	97	64	125	4.5	90.4
	FLA-B	0.15	0.01	0.22	92	81	57	112	13.0	77.0
JAVERIANA	FGDi	0.76	0.51	1.13	24	8	1	25	1.4	29.0
	FGH-A	0.62	0.17	1.54	95	8	4	26	0.5	5.7
	FGH-B	0.63	0.23	1.54	95	8	26	36	0.4	9.0
	FLA-A	0.07	0.004	0.16	95	189	150	266	2.0	58.9
	FLA-B	0.07	0.004	0.26	94	181	132	263	1.7	65.5
CIDER - Restrepo	FGH-A	0.88	0.45	1.52	71	10	5	21	3.4	15.5
	FGH-B	0.81	0.45	1.37	71	10	5	21	1.5	9.0
	FLA-A	0.15	0.05	0.26	75	136	45	241	3.4	64.0
	FLA-B	0.17	0.05	0.22	75	151	140	162	4	75.0

(1) No se mide.

(2) Se lava cada dos días.

(3) Los FLA estaban operando con 0.28 y 0.29 l/s respectivamente.

en el sobrenadante de los FLA. Estos ciclos entre raspados son mayores a los presentados en las plantas Piloto (Tabla 11.15) dadas las características del agua cruda tan diferentes, siendo más favorables en las plantas a escala real.

Los promedios de hierro total y manganeso en el efluente de los FLA estuvieron en el rango de 0.03 a 0.07 mg/l y 0.02 y 0.03 mg/l respectivamente con remociones acumuladas en los FLA del 91% y del 83% respectivamente en la planta de Cañas Gordas.

#### 11.2.4 Plantas de tratamiento con FGAC

Las plantas de El Retiro y Colombo británico poseen FGAC como sistema de pretratamiento.

La calidad de agua efluente de los filtros gruesos en cada una de estas plantas, cumple con las limitaciones sugeridas en la literatura como apta para ser tratada por filtración lenta en arena (Tabla 2.3 del aparte 2), como puede observarse en la Tabla 11.19 y Figura 11.23, así mismo, la calidad del agua tratada cumple con las normas establecidas para consumo humano.

Los niveles de oxígeno disuelto disminuyen en los filtros gruesos y en los FLA, presentando valores que no interfieren con el proceso que se está desarrollando. La alcalinidad total de bicarbonática y la dureza total también fueron bajas en ambas plantas. El pH, ligeramente básico no presentó variación apreciable.

La remoción de sólidos suspendidos acumulada hasta los filtros gruesos, fue de 84% en el Colombo y de 75% en el Retiro, planta en la cual aumentó la eficiencia de hasta 92.5% cuando se introdujo la tecnología de FGD<sub>i</sub>. Esta misma característica se presentó en los demás parámetros medidos (Ver Tablas de remoción al final del capítulo 11).

La remoción acumulada de color real hasta los FLA son superiores al 73%, con valores promedio en el efluente entre 4 y 6 UPC.

En cuanto a la duración de la carrera en los FLA, el Colombo presentó valores entre 23 y 107 días (Tabla 11.22), siendo relativamente altos, si se considera que la máxima carga hidráulica disponible de ellos es de 35 cm, diferente a los de las plantas piloto y demás plantas a escala real que es de 1.00 m. Esto abre una importante posibilidad de reducir la altura de las unidades de FLA con base en un análisis mas detallado del impacto de las unidades de pretratamiento en el comportamiento hidráulico de los FLA y en la forma en que aumenta la pérdida de energía en el tiempo, particularmente en la velocidad de cambio de este aumento de energía después de que el sobrenadante se ha elevado los primeros 30 a 50 cm.

TABLA 11.19 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGAC. Plantas a escala real Parcelación EL Retiro y Colegio Colombo-Británico. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	PARCELACION EL RETIRO								COLEGIO COLOMBO-BRITANICO			
		CRUDA	ACOND. (*)	PRETRA.	FLA	CRUDA	ACOND. (**)	PRETRA.	FLA	CRUDA	ACOND.	PRETRA.	FLA
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	9.3	8.3	2.3	0.2	16	3.6	1.2	0.1	9.8	3.0	1.6	0.1
	Desviación	11	12	4.6	0.6	50	6.3	1.3	0.2	22	5.3	4.0	0.1
	Mínimo	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Máximo	46	64	27	4.0	316	37	6.4	1.0	158	45	35	0.6
	No. Datos	54	48	51	54	40	40	40	39	91	91	91	84
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	14	12	4.6	0.6	14	7.1	3.2	0.6	12	6.2	4.3	0.6
	Desviación	23	19	4.0	0.3	18	7.4	2.6	0.2	15	7.8	8.1	0.4
	Mínimo	4.0	3.0	1.4	0.3	3.5	2.1	1.6	0.3	2.8	1.8	1.2	0.2
	Máximo	180	150	20	2.3	110	38	13	1.1	100	62	80	3.7
	No. Datos	87	69	76	87	40	40	20	39	123	123	123	115
COLOR REAL (UPC)	Promedio	19	17	14	4	22	19	15	6	20	17	14	4
	Desviación	15	13	10	3	10	10	7	2	15	13	13	3
	Mínimo	4	2	1	0	7	3	3	1	4	2	1	1
	Máximo	100	70	55	19	56	53	37	11	108	96	104	11
	No. Datos	87	69	86	87	40	40	40	39	123	123	123	115
COLIFORMES FECALIS (UFC/100mL)	Promedio	7627	5065	307	0.3	3978	1451	209	0.2	26854	6861	767	0.4
	Desviación	24829	9032	397	1.1	4867	1961	251	0.4	33914	7408	615	1.0
	Mínimo	240	220	0	0	473	120	33	0	800	160	24	0
	Máximo	222000	62800	2000	6	23700	10200	1333	2	228000	54000	3700	7
	No. Datos	86	66	84	83	40	40	40	39	119	118	118	109
ESTREPTOCOCOS FECALIS (UFC/100mL)	Promedio	2222	1160	156	0.2	2455	926	139	0.1	11242	2540	666	1.6
	Desviación	3782	1140	167	0.7	2095	376	92	0.3	33268	3082	1041	3.4
	Mínimo	104	72	20	0	1055	400	58	0	760	160	2	0
	Máximo	16800	4100	640	3	8100	1500	376	1	192000	15400	5232	15
	No. Datos	19	18	17	19	9	9	9	9	31	31	32	30

(\*) Sedimentador Simple. Octubre de 1990 a Septiembre de 1991  
 (\*\*) Filtro Grueso Dinámico. Octubre de 1991 a Julio de 1992

TABLA 11.19 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGAC. Plantas a escala real Parcelación El Retiro y Colegio Colombo-Británico. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	PARCELACION EL RETIRO								COLEGIO COLOMBO-BRITANICO			
		CRUDA	ACOND. (*)	PRETRA.	FLA	CRUDA	ACOND. (**)	PRETRA.	FLA	CRUDA	ACOND.	PRETRA.	FLA
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	56	45	44	34	60	48	44	44	69	54	49	47
	Desviación	24	21	15	17	21	10	9	11	27	18	15	18
	Mínimo	26	23	18	6	36	34	29	26	23	17	29	19
	Máximo	114	98	65	62	106	65	54	59	150	103	94	84
	No. Datos	12	11	12	12	7	7	7	7	19	19	19	19
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	26	20	19	14	29	26	24	21	27	22	23	22
	Desviación	14	9	9	11	2	4	4	5	14	14	11	14
	Mínimo	13	5	3	0	24	19	19	15	4	2	7	4
	Máximo	66	36	37	35	31	29	27	29	51	48	53	55
	No. Datos	12	11	12	12	5	5	5	5	16	17	17	16
D.Q.O. (mg/L O <sub>2</sub> )	Promedio	< 12.9	< 9.7	< 8.5	< 6.2	< 8.7	< 6.5	< 6.2	< 5.6	< 10.9	< 7.0	< 6.4	< 5.2
	Desviación	8.1	5.1	4.5	2.2	2.7	2.8	2.6	1.3	6.5	2.6	2.1	0.4
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	32.0	22.0	18.0	12.0	14.4	13.6	12.4	8.8	34.0	12.2	12.0	6.4
	No. Datos	12	11	12	11	8	8	7	7	20	20	19	17
HIERRO (mg/L Fe)	Promedio	1.37	0.87	0.35	< 0.08	0.57	0.29	0.15	< 0.03	1.37	0.45	< 0.25	< 0.13
	Desviación	0.89	0.19	0.25	0.08	0.13	0.18	0.08	0.03	1.90	0.23	0.17	0.15
	Mínimo	0.41	0.61	0.02	0.01	0.32	0.11	0.04	0.01	0.41	0.03	0.01	0.01
	Máximo	3.98	1.07	0.98	0.29	0.76	0.70	0.30	0.09	9.20	0.82	0.70	0.57
	No. Datos	11	3	11	11	7	7	7	7	19	19	19	19
MANGANESO (mg/L Mn)	Promedio	0.19	0.07	< 0.06	< 0.03	0.11	< 0.06	< 0.03	< 0.02	0.15	< 0.05	< 0.03	< 0.02
	Desviación	0.20	0.04	0.07	0.03	0.06	0.04	0.01	0.01	0.11	0.04	0.03	0.02
	Mínimo	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.78	0.12	0.29	0.08	0.18	0.12	0.05	0.03	0.50	0.15	0.12	0.07
	No. Datos	12	3	12	11	8	8	8	8	20	20	19	18

(\*) Sedimentador Simple. Octubre de 1990 a Septiembre de 1991

(\*\*) Filtro Grueso Dinámico. Octubre de 1991 a Julio de 1992

TABLA 11.19 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGAC. Plantas a escala real Parcelación El Retiro y Colegio Colombo-Británico. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	PARCELACION EL RETIRO								COLEGIO COLOMBO-BRITANICO			
		CRUDA	ACOND. (*)	PRETRA.	FLA	CRUDA	ACOND. (**)	PRETRA.	FLA	CRUDA	ACOND.	PRETRA.	FLA
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	6.8	6.6	6.4	6.0	7.0	6.9	6.7	5.6	6.7	5.8	5.7	4.9
	Desviación	0.8	1.3	0.9	1.1	0.5	0.5	0.4	0.4	0.7	0.6	0.7	0.8
	Mínimo	5.1	5.0	4.6	4.5	5.9	5.9	5.8	5.2	5.0	4.6	4.1	3.4
	Máximo	8.2	8.7	8.2	9.6	7.5	7.4	7.3	6.2	8.2	6.9	7.0	6.3
	No. Datos	20	8	18	17	9	9	9	5	28	27	28	23
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	18		19	19	17		17	17	20		28	27
	Desviación	13		16	14	3		4	5	12		38	19
	Mínimo	11		11	13	14		12	13	13		12	15
	Máximo	61		73	65	22		23	25	72		180	76
	No. Datos	12		12	12	9		9	5	20		19	8
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	15		14	15	12		12	13	15		14	15
	Desviación	11		10	10	5		4	4	10		9	11
	Mínimo	8		9	11	7		7	8	3		6	2
	Máximo	53		47	47	19		17	17	54		50	40
	No. Datos	12		12	12	9		9	5	20		19	8
pH (Unidades)	Mínimo	6.5	7.0	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1	6.1	6.6	6.2	6.0	6.4
	Máximo	7.9	7.9	7.8	7.5	7.9	8.0	8.0	7.2	8.0	8.1	7.8	8.0
	No. Datos	37	13	35	19	40	40	40	3	74	60	72	28
TEMPERATURA (°C)	Promedio	21.3	23.1	22.9	20.8	23.1	22.9	22.6	21.0	23.1	23.6	22.5	22.9
	Desviación	2.3	1.2	1.5	1.4	2.1	2.0	1.7	0.8	2.3	1.7	1.6	1.6
	Mínimo	17.5	21.4	21.0	19.0	19.0	19.0	19.0	20.0	18.0	21.0	20.0	21.0
	Máximo	25.3	24.0	25.0	23.0	28.0	27.0	27.0	22.0	28.0	27.0	26.0	26.0
	No. Datos	31	3	8	5	32	29	27	3	58	29	33	10

(\*) Sedimentador Simple. Octubre de 1990 a Septiembre de 1991

(\*\*) Filtro Grueso Dinámico. Octubre de 1991 a Julio de 1992

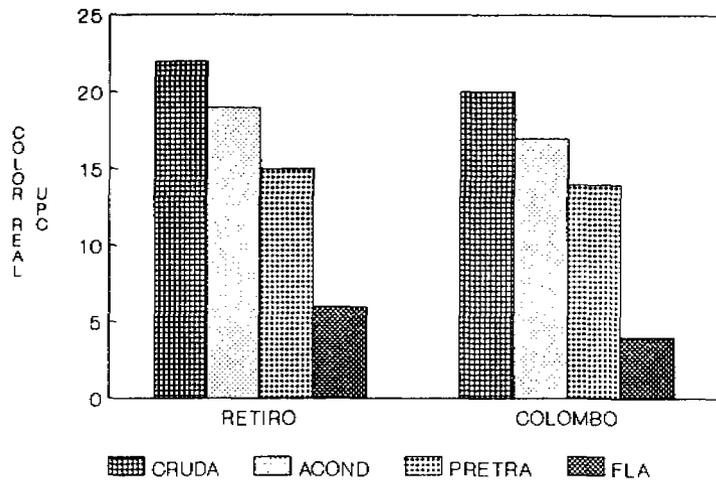
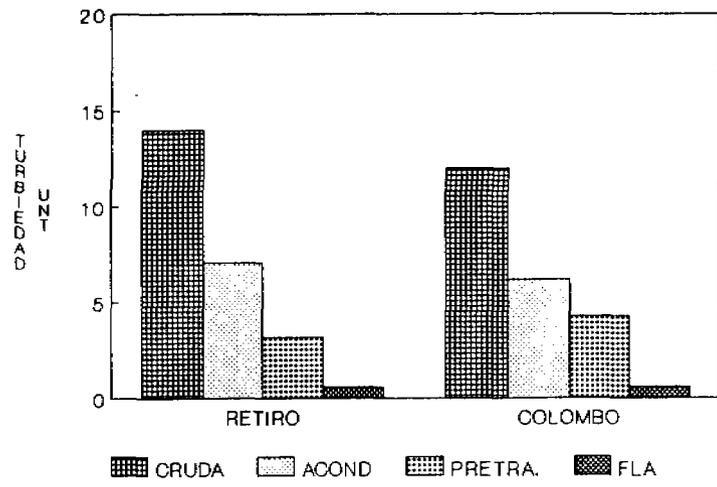
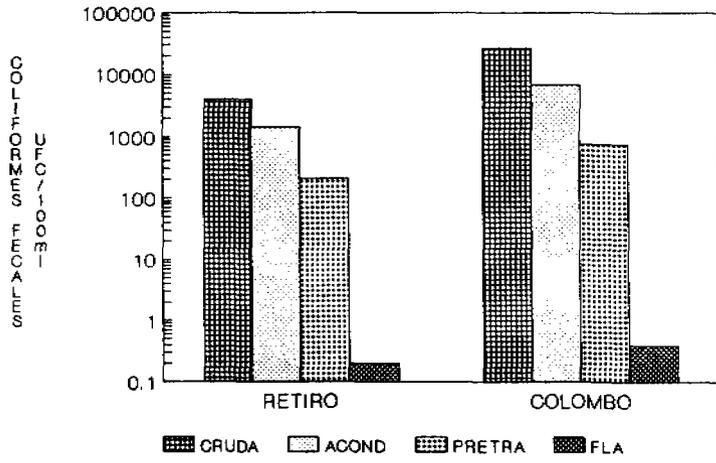
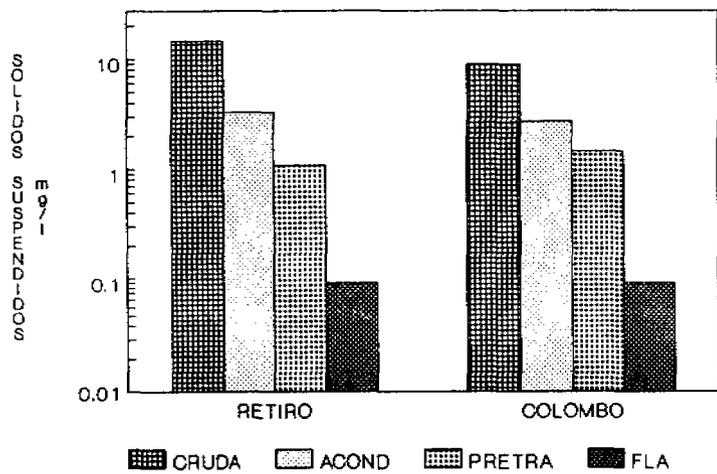


FIGURA 11.23 Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Turbiedad, y Color Real. Plantas a Escala Real con FGAC, Proyecto PRETRATAMIENTOS.

### 11.2.5 Plantas de tratamiento con FGH

Las plantas de Javeriana y CIDER-Restrepo, poseen FGH como sistema de pretratamiento en medios gruesos.

La Tabla 11.20 muestra las estadísticas descriptivas de todos los parámetros evaluados en estas plantas, y la Figura 11.24 los datos de turbiedad, sólidos suspendidos, color real y coliformes fecales. Las mejores remociones en el FGH las presentó la planta Restrepo con 84% en sólidos suspendidos, 64% en turbiedad, 45% en color real, 95% en coliformes fecales y 92.8% en estreptococos fecales. Así mismo los mejores promedios: 0.7 mg/l de sólidos suspendidos, 2.2 UNT de turbiedad, 6 UPC de color real y 69 UFC/100 ml de coliformes fecales. En los filtros lentos, las remociones más altas las presentó la planta Javeriana con 72% en sólidos suspendidos, 81% en turbiedad, 77% en color real, 93.3% en estreptococos fecales y una excelente remoción en coliformes fecales del 99.9%. Los promedios en los FLA fueron similares para ambas plantas: 0.1 mg/l de sólidos suspendidos, 0.6 UNT de turbiedad, 3 UPC de color real, excepto los coliformes fecales y estreptococos fecales que fueron mejores para la Javeriana con un mismo promedio de 0.2 UFC/100 ml.

Al igual que en las demás plantas a escala real, la duración de carrera de los FLA fue superior a los de las plantas piloto, con valores entre 130 y 266 días para Javeriana y 45 y 241 días para CIDER, con promedios de 189 y 151 días respectivamente.

El promedio de oxígeno disuelto en ambas plantas disminuye en los filtros gruesos, ya que no hay posibilidades de oxigenación, por la forma como circula el agua, sin embargo, al pasar a los filtros lentos el efecto es diferente para las dos plantas, así, aumenta ostensiblemente en la planta de Restrepo (10 mg/l) por efecto de la alta proliferación de algas y disminuye en la Javeriana donde están más controladas. La alcalinidad total y la dureza total no son removidos a lo largo del sistema, aumentando ligeramente en el filtro grueso y en el FLA. La alcalinidad total en la planta de Restrepo algunas veces presentó además de bicarbonatos, carbonatos, alcanzando el pH máximo de 9.3 unidades en el filtro grueso y 9.5 unidades en el FLA. El hierro y el manganeso son mejor removidos en el filtro horizontal en la planta Javeriana por efecto del filtro dinámico con una eficiencia del 76.8 y 78% respectivamente, mientras que en los filtros lentos, la remoción de hierro es similar en ambas plantas (92%) presentando la planta Javeriana los mejores promedios (menores de 0.01 mg/l). El manganeso igualmente es mejor removido en la planta Javeriana, por efecto del filtro dinámico con una eficiencia del 78%. En los filtros lentos es más eficiente la planta de Restrepo con una eficiencia acumulada del 85.7% en remoción de hierro y valores promedio menores de 0.02 mg/l.

TABLA 11.20 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGH. Plantas a escala real Universidad Javeriana y CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	UNIVERSIDAD JAVERIANA				CIDER-RESTREPO		
		CRUDA	FGDi	FGH	FLA	CRUDA	FGH	FLA
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	14	5.9	1.3	0.1	4.3	0.7	0.1
	Desviación	21	7.9	3.3	0.3	5.3	1.0	0.3
	Mínimo	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
	Máximo	150	43	27	1.5	27	5.0	1.3
	No. Datos	93	92	92	89	51	49	51
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	18	10	3.7	0.7	7.2	2.2	0.6
	Desviación	15	7.8	2.7	0.3	7.6	2.0	0.4
	Mínimo	4.9	3.2	1.8	0.3	2.1	0.7	0.3
	Máximo	112	55	21	2.1	43	16	2.4
	No. Datos	124	121	102	120	83	80	83
COLOR REAL (UPC)	Promedio	23	20	13	3	11	6	3
	Desviación	13	10	8	3	13	6	2
	Mínimo	5	6	1	1	2	1	1
	Máximo	96	67	38	13	96	37	8
	No. Datos	124	121	123	120	83	83	83
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	6816	3629	247	0.2	947	47	0.7
	Desviación	12422	6518	334	0.6	1830	71	2.9
	Mínimo	310	210	26	0	10	0	0
	Máximo	98000	59000	1940	3	15100	376	25
	No. Datos	121	119	121	111	79	78	80
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100mL)	Promedio	3513	1965	310	0.2	954	69	4.6
	Desviación	3860	1963	430	0.5	1717	130	16.2
	Mínimo	300	100	34	0	74	2	0
	Máximo	18400	9100	1900	2	9400	640	86
	No. Datos	30	29	30	28	28	28	28

TABLA 11.20 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en Líneas de FGH. Plantas a escala real Universidad Javeriana y CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992. (Continuación)

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	UNIVERSIDAD JAVERIANA				CIDER-RESTREPO		
		CRUDA	FGDi	FGH	FLA	CRUDA	FGH	FLA
SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Promedio	67	56	47	42	132	123	117
	Desviación	22	25	13	17	20	19	15
	Mínimo	23	22	16	4	89	83	82
	Máximo	113	127	79	72	182	165	142
	No. Datos	21	19	19	18	21	21	21
SOLIDOS VOLATILES (mg/L)	Promedio	28	24	18	14	40	32	27
	Desviación	14	17	8	10	16	15	14
	Mínimo	7	2	5	1	9	7	3
	Máximo	74	82	35	38	63	59	46
	No. Datos	17	16	15	14	19	19	19
D.Q.O. (mg/l O2)	Promedio	< 8.8	< 7.1	< 5.6	< 5.0	< 8.5	< 6.0	< 5.1
	Desviación	4.1	3.4	1.6	0.0	5.3	2.3	0.4
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	20.8	18.4	12.0	5.2	26.4	14.4	6.4
	No. Datos	21	20	18	18	22	22	22
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	1.21	0.71	0.28	< 0.10	0.69	< 0.23	< 0.05
	Desviación	1.08	0.73	0.28	0.13	0.51	0.27	0.05
	Mínimo	0.21	0.04	0.04	0.01	0.14	0.01	0.01
	Máximo	5.60	3.50	1.30	0.48	2.05	1.20	0.21
	No. Datos	21	20	20	18	22	22	22
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.18	0.11	< 0.04	< 0.02	0.14	< 0.05	< 0.02
	Desviación	0.09	0.05	0.02	0.02	0.14	0.05	0.02
	Mínimo	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.38	0.18	0.10	0.06	0.62	0.20	0.07
	No. Datos	21	19	19	17	22	22	21

TABLA 11.20 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados en líneas de FGH. Plantas a escala real Universidad Javeriana y CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	UNIVERSIDAD JAVERIANA				CIDER-RESTREPO		
		CRUDA	FGDi	FGH	FLA	CRUDA	FGH	FLA
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	Promedio	6.7	6.4	5.6	3.9	6.7	6.4	8.2
	Desviación	0.9	0.7	0.9	1.0	1.1	0.4	1.9
	Mínimo	4.1	5.0	4.0	2.0	5.4	5.5	4.5
	Máximo	8.8	7.6	7.6	6.0	12.0	7.0	11.6
	No. Datos	29	27	29	21	30	27	24
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	16		17	16	57	55	56
	Desviación	4		3	3	5	12	4
	Mínimo	11		12	8	47	5	49
	Máximo	26		24	22	65	67	66
	No. Datos	21		20	13	22	22	17
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	12		14	16	58	59	55
	Desviación	3		3	3	14	15	15
	Mínimo	4		6	10	35	35	31
	Máximo	19		20	21	77	80	76
	No. Datos	21		20	13	22	22	17
pH (Unidades)	Mínimo	6.3	6.3	6.4	6.7	7.3	7.0	7.8
	Máximo	8.1	7.8	7.8	7.6	9.0	9.3	9.5
	No. Datos	72	61	70	23	31	29	23
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	22.9	23.0	23.2	23.8	20.8	22.2	21.7
	Desviación	2.1	1.5	1.3	1.4	2.3	0.9	1.2
	Mínimo	18.0	20.0	21.0	22.0	15.0	20.0	20.0
	Máximo	27.0	26.0	26.0	26.0	24.0	24.0	23.0
	No. Datos	59	33	35	7	27	13	5

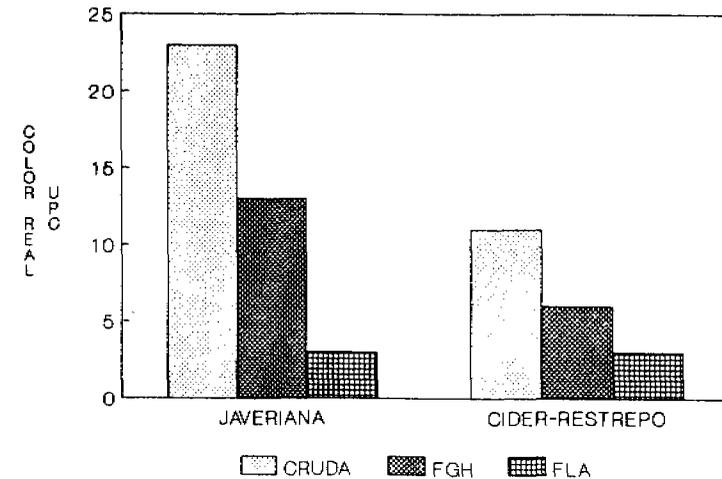
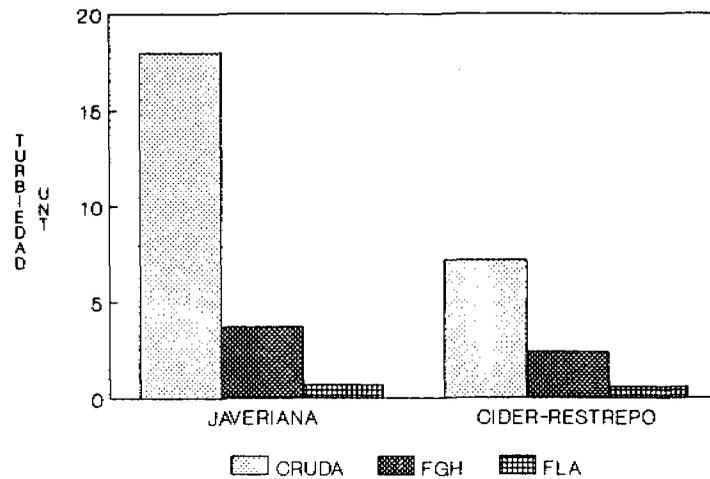
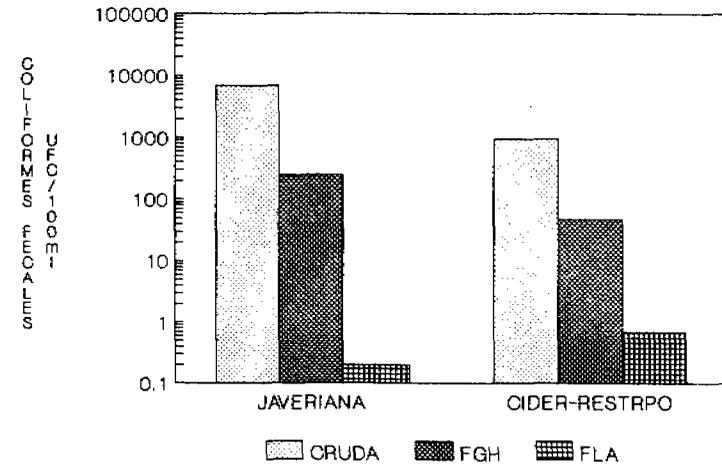
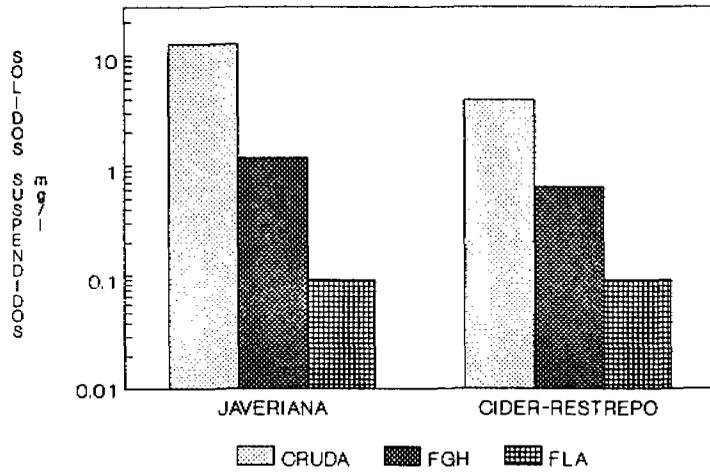


FIGURA 11.24 Promedio de Sólidos Suspendidos, Coliformos Fecales, Turbiedad, y Color Real. Plantas a Escala Real con FGH, Proyecto PRETRATAMIENTOS.

## 12 DISCUSION GENERAL

### 12.1 LIMITACIONES DE LAS FUENTES DE AGUA PARA SU TRATAMIENTO DIRECTO CON FILTRACIÓN LENTA EN ARENA

Se pueden distinguir dos tipos principales de ríos dentro de las fuentes superficiales incluidas en el presente estudio: ríos pequeños de ladera (las cuatro derivaciones del río Pance , el río Morales y las quebradas La Elvira y Calimita) y un río de valle , el río Cauca. Aunque el riesgo sanitario asociado con los ríos de ladera es menor que el del río de valle, todos ellos presentan una o varias limitaciones para su tratamiento directo con unidades de filtración lenta en arena. A continuación se discute sobre estas limitaciones o las posibilidades de tratamiento, a la luz de la revisión hecha en el aparte 2.2 de este informe.

#### 12.1.1 Niveles de contaminación que superan la eficiencia.

El río Cauca presentó durante el estudio un promedio de contaminación microbiológica en el rango de 31386 (Periodo II, Tabla 11.13 ) a 136147 UFC/100 ml de coliformes fecales (Periodo I, Tabla 11.4). Los ríos de ladera estuvieron en el rango de 368 a 26854 UFC/100 ml (Tabla 11.25). Sin embargo a este valor más bajo presentado en la fuente que alimenta la planta de Ceylán, correspondió un promedio de 1085 UFC/100 ml con una desviación estándar (DS) de 816 UFC/100 ml (Tabla 11.25) de estreptococos fecales indicativo de una contaminación fecal de origen animal o relativamente remota en tiempo o distancia (OMS, 1992). Estos valores de contaminación claramente superan la eficiencia de remoción de entero-bacterias normalmente reportada en la literatura para la tecnología de FLA y resumidas en la Tabla 2.2. Consecuentemente, sería poco probable producir un efluente con bajo riesgo sanitario, apto para la desinfección como barrera de seguridad, si se utilizaran directamente unidades de FLA para el tratamiento.

El valor promedio de Color Real en el río Cauca varió entre 35 (Periodo IV, Tabla 11.14) y 73 UPC (Periodo I, Tabla 11.4). En los ríos de ladera la variación estuvo entre 5 (Tabla 11.17) y 23 UPC (Tabla 11.20). A diferencia de lo que se observa para los ríos de ladera, el tratamiento directo con unidades de FLA del agua del río Cauca no sería suficiente según las eficiencias revisadas en el aparte 2.2, para producir un efluente que cumpla el criterio de 15 UPC de la legislación sanitaria (Ministerio de Salud de Colombia, 1983).

#### 12.1.2 Reducción o inhibición de la eficiencia.

Durante el estudio, la temperatura promedio del río Cauca fue de 23°C. En los ríos de ladera la temperatura promedio más baja la presentó la fuente de la planta La Marina con 18.4°C

y la más alta la fuente de la planta del Colombo-Británico con 23.1°C. En todos los casos las desviaciones estandar estuvieron por debajo de los 3°C. Estos valores antes de inhibir, pueden estimular la actividad de la biomasa presente en los medios filtrantes, la cual no se ve sometida a las adaptaciones necesarias por los cambios periódicos de temperatura y calidad de agua propios de los países estacionales.

El valor promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) en el río Cauca varió entre 9.5 y 25.4 mg/l durante los primeros cuatro Periodos de estudio con las Plantas Piloto y entre 5.9 y 12.9 mg/l en los ríos de ladera. En el estudio no se realizaron mediciones específicas de nitrógeno, fósforo o azufre. Sin embargo, teniendo en cuenta el nivel de contaminación de la cuenca, no se espera que los niveles de materia orgánica o nutrientes sean factores limitantes para actividad biológica. Al contrario, considerando los niveles de DQO encontrados en el río Cauca, es de interés la experiencia de Sundaresan et al (1982) según la cual, niveles de DQO > 20 mg/l en la fuente de agua, equivalentes a una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del orden de 5 mg/l, reducen la capacidad de las unidades de FLA para remover algas e indicadores de calidad microbiológica.

Los niveles de oxígeno disuelto a la entrada de las Plantas Piloto estuvieron por encima de 5.0 mg/l y en las planta a escala real por encima de 6.0 mg/l. Además, el diseño de las estructuras de entrada a las diferentes unidades facilita la reaeración del afluente. En consecuencia, el OD no es un factor limitante para el comportamiento de las unidades evaluadas.

### **12.1.3 Reducción de las carreras de filtración**

El río Cauca presentó el promedio más bajo de turbiedad durante el Periodo IV con un valor de 54 UNT para un conjunto de 427 datos con una desviación estándar (DS) de 59 UNT y un valor máximo de 500 UNT (ver Tabla 11.14). Aún para este periodo más favorable, los valores de turbiedad resultan demasiado altos para su tratamiento directo con unidades de FLA. En contraste con lo anterior, la fuente de agua que alimenta la planta de Ceylán presentó un promedio de turbiedad de 2.5 UNT, para un conjunto de 85 datos con una desviación estándar de 0.6 UNT y un valor máximo de 4.6 UNT (ver Tabla 11.17). Desde el punto de vista de turbiedad esta fuente podría ser tratada directamente por unidades de FLA, sin embargo considerando sus niveles de contaminación microbiológica, esto implicaría que el efluente quedara dependiendo fuertemente de la desinfección terminal para producir un agua de bajo riesgo sanitario, según se discutió al comienzo del aparte 12.1.1.

Las concentraciones promedio de hierro total y de manganeso en el río Cauca estuvieron en el rango de 3.5 a 4.6 mg/l y de 0.57 a 0.88 mg/l en los tres últimos periodos de estudio (ver Tablas 11.12, 11.13 y 11.14). Estos valores superan los límites recomendados en la tabla 2.3, orientados a proteger las unidades de FLA de colmataciones demasiados frecuentes.

Consecuentemente el pretratamiento de la fuente es necesario antes de alimentar las unidades de FLA.

De nuevo, el río de ladera que alimenta la planta de Ceylán podría ser tratado durante todo el tiempo directamente con unidades de FLA, teniendo en cuenta su contenido de hierro total y manganeso (ver Tabla 11.25) y las recomendaciones de autores como Spencer et al. (1991) o Di Bernardo (1991), resumidas en la Tabla 2.3. Aunque los otros ríos de ladera presentan valores mas bajos que el río Cauca para este par de parámetros (ver Tablas 11.25, 11.26 y 11.27) su acondicionamiento previo parece también aconsejable de acuerdo con algunas de las recomendaciones resumidas en la Tabla 2.3.

## 12.2 EFICIENCIAS PARCIALES DE LAS ETAPAS DE PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO

Después de establecido el potencial de la tecnología de Filtración Gruesa Dinámica como primera etapa de o acondicionamiento (ver Tablas 11.1 y 11.2), se estudió su combinación con diferentes alternativas de filtración gruesa (ver apartes 4.4.3 a 4.4.5.) como herramienta para potencializar la aplicación de la tecnología de FLA. En la Figura 12.1 se ilustra el tipo de planta que corresponde a este esquema de tratamiento.

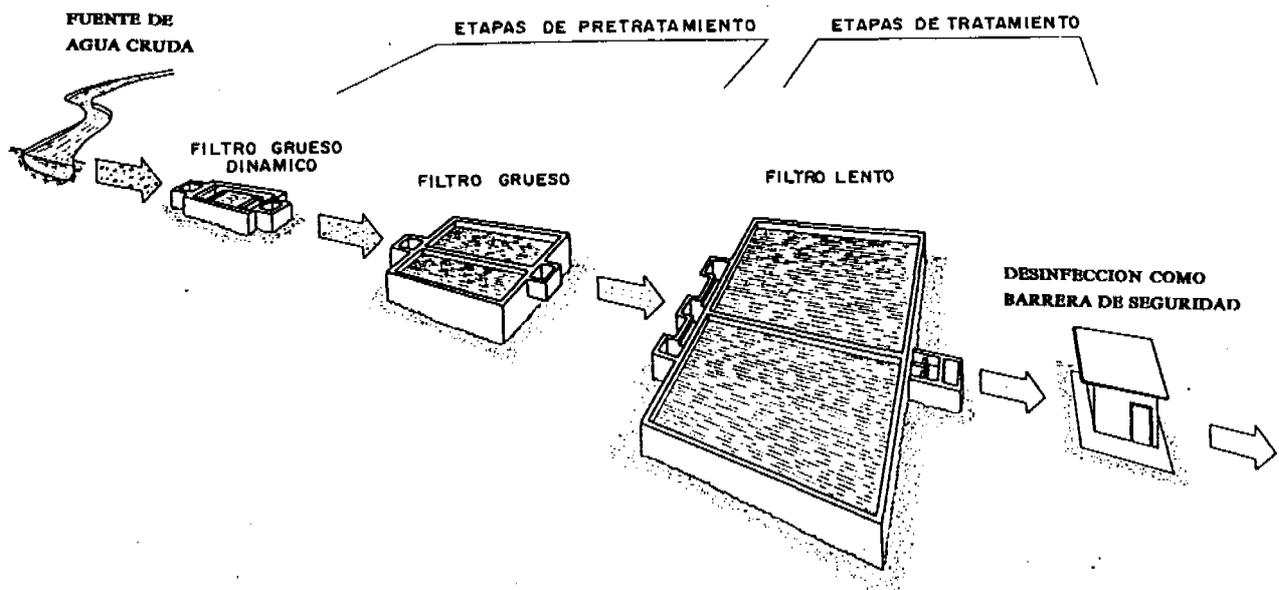


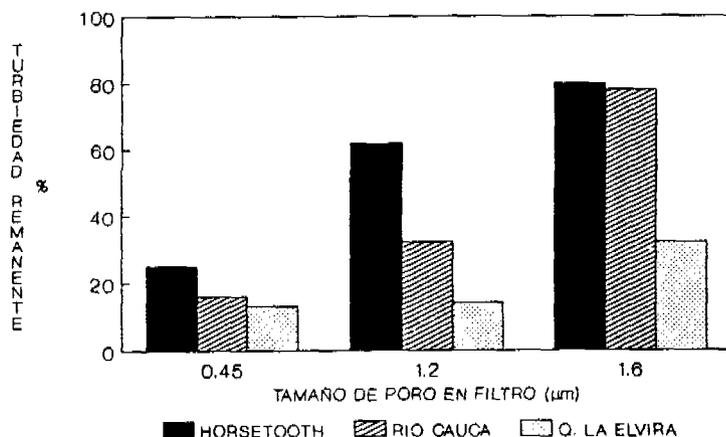
FIGURA 12.1 Planta de tratamiento con base en la combinación de varias etapas de filtración con la desinfección terminal como barrera de seguridad.

Con base en los resultados presentados en el capítulo 11 y a las estadísticas descriptivas para las etapas intermedias de los filtros gruesos reportadas Anexo 5, se incluyen aquí las Tablas 12.1 a 12.4 para las plantas piloto y las Tablas 12.5 a 12.8 para las plantas a escala real, orientadas a facilitar la discusión sobre la forma en que el esquema de tratamiento, responde a los conceptos de multibarrera y de tratamiento integrado enunciados en los apartes 3 y 4.5 respectivamente.

### 12.2.1 Primera etapa de pretratamiento

La primera etapa de pretratamiento, constituida por la tecnología de FGD<sub>i</sub>, presenta un buen potencial en la reducción de sólidos suspendidos, con remociones en el rango de 56 a 77%. Este potencial es menor en la reducción de turbiedad, con remociones en el rango de 34 a 41%. Estas diferencias podrían explicarse por un predominio de partículas pequeñas en la fuente de agua que al no ser retenidas en las unidades de FGD<sub>i</sub> influyen de manera más significativa en el parámetro de turbiedad que en el de sólidos suspendidos. Esta posibilidad se sustenta en la Figura 12.2 en la cual se observa que si se pasa agua a través de un filtro de membrana con poros de 1.6  $\mu\text{m}$  cerca del 80% de la turbiedad permanece en el filtrado, de manera semejante a lo que sucede con el agua del embalse de Horsetooth, reconocido por su turbiedad originada en partículas finas o coloidales, según lo reporta Bellamy et al. (1985).

Es de interés observar también en la Figura 12.2 que la quebrada la Elvira, el río de ladera que alimenta la planta a escala real de Ceylán, presenta una turbiedad asociada a tamaños mayores de partículas. Esto parece consistente con el alto valor de remoción de sólidos suspendidos y turbiedad que presenta su primera etapa de (68%) a pesar de los valores bajos que presenta el agua cruda: 2.4 mg/l y 2.5 UNT, respectivamente (Ver Tablas 12.5 y 12.6).



**FIGURA 12.2** Turbiedad remanente después de pasar muestras de agua por filtros de membrana de diferentes tamaños.

TABLA 12.1 Remoción de Sólidos Suspendidos en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III, IV.

PERIODO DEL PROYECTO	AGUA CRUDA PROMEDIO mg/L	AGUA ACONDICIONADA		LINEA DE TRATAMIENTO	AGUA PRETRATADA						AGUA TRATADA		
		PROMEDIO mg/L	RENOCION PARCIAL %		RENOCION POR ETAPA %			PROMEDIO mg/L	RENOCION %		PROMEDIO mg/L	RENOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
II	187	74	60.43	FGAS	83.78	50.83	62.71	2.2	97.03	98.82	0.3	86.36	99.84
				FGAC	94.19			4.3	94.19	97.70	0.2	95.35	99.89
				FGHM	*	*	*	4.1	94.46	97.81	0.4	92.24	99.79
				FGH	*	*	*	1.7	97.70	99.09	0.2	88.24	99.89
				FGDS	86.49	56.00	54.55	2.0	97.30	98.93	0.2	90.00	99.89
III	102	29	71.57	FGAS	74.48	51.35	63.89	1.3	95.52	98.73	0.1	92.31	99.90
				FGAC	84.48			4.5	84.48	95.59	0.3	93.33	99.71
				FGHM	*	*	*	2.9	90.00	97.16	0.3	89.66	99.71
				FGH	*	*	*	1.2	95.86	98.82	0.1	91.67	99.90
				FGDS	77.93	48.44	54.55	1.5	94.83	98.53	0.2	86.67	99.80
IV	60.7	14.2	76.61	FGAS	62.68	47.17	60.71	1.1	92.25	98.19	0.1	90.91	99.84
				FGAC	78.87			3.0	78.87	95.06	0.2	93.33	99.67
				FGHM	*	*	*	2.1	85.21	96.54	0.2	90.48	99.67
				FGH	*	*	*	0.9	93.66	98.52	0.1	88.89	99.84
				FGDS	62.68	49.06	55.56	1.2	91.55	98.02	0.1	91.67	99.84

\* La estructura del FGH dificulta la toma de muestras en las etapas intermedias (etapas 1 y 2).

TABLA 12.2 Remoción de Turbiedad en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III, IV.

PERIODO DEL PROYECTO	AGUA CRUDA PROMEDIO UNT	AGUA ACONDICIONADA		LINEA DE TRATAMIENTO	AGUA PRETRATADA					AGUA TRATADA			
		PROMEDIO UNT	REMOCION PARCIAL %		REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO UNT	REMOCION %		PROMEDIO UNT	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
II	99	65	34.34	FGAS	52.31	32.26	47.62	11	83.08	89.89	4.2	61.82	95.76
				FGAC	70.77			19	70.77	80.81	3.1	83.68	96.87
				FGHM	*	*	*	19	70.77	80.81	4.6	75.79	95.35
				FGH	*	*	*	12	81.54	87.88	3.3	72.50	96.67
				FGDS	50.77	31.25	36.36	14	78.46	85.86	4.2	70.00	95.76
III	59	35	40.68	FGAS	42.86	30.00	41.43	8.2	76.57	86.10	2.0	75.61	96.61
				FGAC	54.29			16.0	54.29	72.88	3.3	79.38	94.41
				FGHM	*	*	*	13.0	62.86	77.97	3.1	76.15	94.75
				FGH	*	*	*	8.2	76.57	86.10	2.4	70.73	95.93
				FGDS	42.85	30.00	34.28	9.2	73.71	84.41	3.1	66.30	94.75
IV	52	30	42.31	FGAS	36.67	31.58	47.69	6.8	77.33	86.92	1.3	80.88	97.50
				FGAC	56.67			13.0	56.67	75.00	1.5	88.46	97.12
				FGHM	*	*	*	11.0	63.33	78.85	1.6	85.45	96.92
				FGH	*	*	*	6.3	79.00	87.88	1.4	77.78	97.31
				FGDS	36.67	31.58	40.00	7.8	77.00	85.00	1.5	80.77	97.12

\* La estructura del FGH dificulta la toma de muestras en las etapas intermedias (etapas 1 y 2).

TABLA 12.3 Remoción de Color Real en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III, IV.

PERIODO DEL PROYECTO	AGUA CRUDA PROMEDIO UPC	AGUA ACONDICIONADA		LINEA DE TRATAMIENTO	AGUA PRETRATADA						AGUA TRATADA		
		PROMEDIO UPC	REMOCION PARCIAL %		REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO UPC	REMOCION %		PROMEDIO UPC	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
II	71	63	11.27	FGAS	20.63	26.00	45.95	20	68.25	71.83	6	70.00	91.55
				FGAC	46.03			34	46.03	52.11	5	85.29	92.96
				FGHM	*	*	*	31	50.79	56.34	6	80.65	91.55
				FGH	*	*	*	22	65.08	69.01	6	72.73	91.55
				FGDS	19.05	23.53	30.77	27	57.14	61.97	6	77.78	91.55
III	53	46	13.21	FGAS	15.22	17.95	34.38	21	54.35	60.38	7	66.67	86.79
				FGAC	28.26			33	28.26	37.74	10	69.70	81.13
				FGHM	*	*	*	29	36.96	45.28	11	62.07	79.25
				FGH	*	*	*	22	52.17	58.49	9	59.09	83.02
				FGDS	13.04	17.50	27.27	24	47.83	54.72	10	58.33	81.13
IV	35	30	14.29	FGAS	16.67	16.00	33.33	14	53.33	60.00	6	57.14	82.86
				FGAC	30.00			21	30.00	40.00	7	66.67	80.00
				FGHM	*	*	*	18	40.00	48.57	8	55.56	77.14
				FGH	*	*	*	14	53.33	60.00	7	50.00	80.00
				FGDS	13.33	19.23	23.81	16	46.67	54.29	7	56.25	80.00

\* La estructura del FGH dificulta la toma de muestras en las etapas intermedias (etapas 1 y 2)

TABLA 12.4 Remoción de Coliformes Fecales en Porcentaje. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodos II, III, IV.

PERIODO DEL PROYECTO	AGUA CRUDA PROMEDIO UFC/100 ml	AGUA ACONDICIONADA		LINEA DE TRATAMIENTO	AGUA PRETRATADA						AGUA TRATADA				
		PROMEDIO UFC/100 ml	REMOCION PARCIAL %		REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO UFC/100 ml	REMOCION %			PROMEDIO UFC/100 ml	REMOCION %		
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA	# Log		PARCIAL	ACUMULADA	# Log
134 II	42658	22890	46.34	FGAS	90.23	70.27	89.92	67	99.71	99.84	2.5	0.2	99.70	99.9995	5.3
				FGAC	98.38			370	98.38	99.13	1.8	0.6	99.84	99.9986	4.9
				FGHM	*	*	*	865	96.22	97.97	1.4	2.2	99.75	99.9948	4.3
				FGH	*	*	*	183	99.20	99.57	2.1	1.0	99.45	99.9977	4.6
				FGDS	81.67	83.10	78.84	150	99.34	99.65	2.2	0.9	99.40	99.9979	4.7
III	30185	7964	73.62	FGAS	85.13	64.27	91.02	38	99.52	99.87	2.9	0.1	99.74	99.9997	5.5
				FGAC	94.48			440	94.48	98.54	1.8	2.7	99.39	99.9911	4.0
				FGHM	*	*	*	504	93.67	98.33	1.8	2.0	99.60	99.9934	4.2
				FGH	*	*	*	75	99.06	99.75	2.6	0.3	99.60	99.9990	5.0
				FGDS	85.40	71.28	88.62	38	99.52	99.87	2.9	0.3	99.21	99.9990	5.0
IV	88609	15598	82.40	FGAS	83.88	76.10	90.35	58	99.63	99.93	3.2	0.5	99.14	99.9994	5.2
				FGAC	95.95			631	95.95	99.29	2.1	1.8	99.71	99.9980	4.7
				FGHM	*	*	*	732	95.31	99.17	2.1	1.1	99.85	99.9988	4.9
				FGH	*	*	*	123	99.21	99.86	2.9	0.2	99.84	99.9998	5.6
				FGDS	87.47	69.97	89.61	61	99.61	99.93	3.2	0.2	99.67	99.9998	5.6

\* La estructura del FGH dificulta la toma de muestras en las etapas intermedias (etapas 1 y 2).

TABLA 12.5 Remoción de Sólidos Suspendedos. Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992.

PLANTA DE TRATAMIENTO	CLASE DE PRETRATAMIENTO	AGUA CRUDA PROMEDIO (mg/L)	AGUA ACONDICIONADA			AGUA PRETRATADA					AGUA TRATADA		
			PROMEDIO (mg/L)	REMOCION PARCIAL %	REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO (mg/L)	REMOCION %		PROMEDIO (mg/L)	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
CEYLAN	FGAS	2.4			68.00	12.50		0.2	91.67	91.67	0.1	50.00	95.83
LA MARINA	FGAS	4.5			38.46	15.63	3.70	1.4	68.89	68.89	0.3	78.57	93.33
CAÑAS GORDAS	FGDi + FGAS	9.5	6.6	30.53	36.36	40.48		2.5	62.12	73.68	0.1	96.00	98.95
COLOMBO	FGDi + FGAC	9.8	3.0	69.39				1.6	46.67	83.67	0.1	93.75	98.98
RETIRO	SS + FGAC	9.3	8.3	10.75				2.3	72.28	75.26	0.2	91.30	97.84
RETIRO	FGDi + FGAC	16.0	3.6	77.50				1.2	66.66	92.50	0.1	91.67	99.37
RESTREPO	FGH	4.3			39.77	38.46	12.50	0.7	83.72	83.72	0.1	85.71	97.67
JAVERIANA	FGDi + FGH	14.0	5.9	57.86	38.98	36.11	43.48	1.3	77.96	90.71	0.1	92.31	99.29

TABLA 12.6 Remoción de Turbiedad. Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992.

PLANTA DE TRATAMIENTO	CLASE DE PRETRATAMIENTO	AGUA CRUDA PROMEDIO UNT	AGUA ACONDICIONADA		AGUA PRETRATADA					AGUA TRATADA			
			PROMEDIO UNT	REMOCION PARCIAL %	REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO UNT	REMOCION %		PROMEDIO UNT	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
CEYLAN	FGAS	2.5			68.00	12.50		0.7	72.00	72.00	0.4	42.86	84.00
LA MARINA	FGAS	5.2			38.46	15.63	3.70	2.6	50.00	50.00	1.0	61.54	80.77
CAÑAS GORDAS	FGDi + FGAS	10.0	8.0	31.25	16.36	42.50	12.00	4.6	42.50	54.00	0.8	82.61	92.00
COLOMBO	FGDi + FGAC	12.0	6.2	48.33	30.65			4.3	30.64	64.17	0.6	86.05	95.00
RETIRO	SS + FGAC	14.0	12.0	14.28				4.6	61.67	67.14	0.6	86.95	95.71
RETIRO	FGDi + FGAC	14.0	7.1	49.28				3.2	54.92	77.14	0.6	81.25	95.71
RESTREPO	FGH	7.2			48.61	32.43	12.00	2.2	69.44	69.44	0.6	72.73	91.67
JAVERIANA	FGDi + FGH	18.0	10.0	44.44	37.00	30.16	22.72	3.7	63.00	81.11	0.7	81.08	96.11

TABLA 12.7 Remoción de Color Real. Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992.

PLANTA DE TRATAMIENTO	CLASE DE PRETRATAMIENTO	AGUA CRUDA PROMEDIO UPC	AGUA ACONDICIONADA		AGUA PRETRATADA					AGUA TRATADA			
			PROMEDIO UPC	REMOCION PARCIAL %	REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO UPC	REMOCION %		PROMEDIO UPC	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
CEYLAN	FGAS	5			20.00	00.00		4	20.00	20.00	2	50.00	60.00
LA MARINA	FGAS	6			16.67	00.00	20.0	4	33.33	33.33	2	50.00	66.67
CAÑAS GORDAS	FGDi + FGAS	19	17	10.53	11.76	6.67		14	17.64	26.32	3	78.57	84.21
COLOMBO	FGDi + FGAC	20	17	15.00				14	17.64	30.00	4	71.43	80.00
RETIRO	SS + FGAC	19	17	10.52				14	17.64	26.32	4	71.43	78.94
RETIRO	FGDi + FGAC	22	19	13.64				15	21.05	31.82	6	60.00	72.72
RESTREPO	FGH	11			27.27	12.50	14.29	6	45.45	45.45	3	50.00	72.72
JAVERIANA	FGDi + FGH	23	20	13.04	15.00	17.65	7.14	13	35.00	43.47	3	76.92	86.95

TABLA 12.8 Remoción de Coliformes Fecales. Plantas a Escala Real. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre 1990 a Julio 1992.

PLANTA DE TRATAMIENTO	CLASE DE PRETRATAMIENTO	AGUA CRUDA PROMEDIO UFC/100 ml	AGUA ACONDICIONADA			AGUA PRETRATADA				AGUA TRATADA			
			PROMEDIO UFC/100 ml	REMOCION PARCIAL %	REMOCION POR ETAPA %			PROMEDIO UFC/100 ml	REMOCION %		PROMEDIO UFC/100 ml	REMOCION %	
					1	2	3		PARCIAL	ACUMULADA		PARCIAL	ACUMULADA
CEYLAN	FGAS	368			75.00	50.00		46	87.50	87.50	0.6	98.70	99.8370
LA MARINA	FGAS	565			53.45	22.43	38.24	126	77.70	77.70	1.2	99.05	99.7876
CAÑAS GORDAS	FGDi + FGAS	6269	4099	34.61	86.61	33.70		364	91.11	94.19	0.9	99.75	99.9856
COLOMBO	FGDi + FGAC	26854	6861	74.45				767	88.82	97.14	0.4	99.95	99.9985
RETIRO	SS + FGAC	7627	5065	33.59				307	93.93	95.97	0.3	99.90	99.9960
RETIRO	FGDi + FGAC	3978	1451	63.52				209	85.59	94.75	0.2	99.90	99.9949
RESTREPO	FGH	947			74.34	30.04	72.35	47	95.04	95.04	0.7	98.51	99.9260
JAVERIANA	FGDi + FGH	6816	3629	46.75	78.18	43.69	44.62	247	93.19	96.38	0.2	99.92	99.9971

Durante el desarrollo del Proyecto la planta a escala real El Retiro cambió su unidad de acondicionamiento de Sedimentación Simple a la alternativa de FGD<sub>i</sub>, aprovechando la misma estructura existente. Esto se reflejó en su significativo incremento en la capacidad de remoción de sólidos suspendidos y de turbiedad, con cambios del 11 al 78% y del 14 al 49% respectivamente (ver Tablas 12.5 y 12.6). Esto sustenta adicionalmente el potencial de esta tecnología para remover el material más grueso presente en la fuente de agua.

En las unidades de FGD<sub>i</sub> a escala piloto las velocidades de aproximación a los lechos filtrantes fueron de 1.0, 1.5 y 2.0 m/h en el periodo II y de 1.5, 2.0 y 3.0 m/h durante los periodos III y IV. Particularmente en los periodos III y IV (ver Tabla 11.10) no se observaron diferencias significativas en la capacidad de remoción en sólidos suspendidos. En las plantas a escala real, Cañas gordas presentó los valores más bajos de remoción, del orden del 31% (ver Tablas 11.21 y 11.22) operando a una velocidad de 10.2 m/h (ver Tabla 7.7). Consecuentemente esta tecnología puede operar con velocidades de 3 m/h o mayores dependiendo de las características de la fuente y de las eficiencias esperadas en las otras etapas de tratamiento.

En contraste con el parámetro de sólidos suspendidos, el potencial de la tecnología de FGD<sub>i</sub> para remover color real es muy limitada, como se desprende de los resultados tanto a escala piloto (ver Tabla 11.11) como escala real (ver Tabla 12.7). En estas mismas Tablas se puede observar que en cuanto a coliformes fecales se refiere, el potencial es mejor que para color, posiblemente porque parte de la contaminación de naturaleza microbiológica está asociada a partículas o material floculento. También se observa en las Tablas 11.12 a 11.13 y 11.25 a 11.27 algún potencial de la tecnología para la remoción de hierro total y manganeso, posiblemente debido a la retención de flóculos originados en oxidación de naturaleza química.

Debido a sus velocidades relativamente altas de filtración y a su poca profundidad del lecho filtrante, la tecnología de FGD<sub>i</sub> representa menos del 5% de los costos de inversión en un esquema de tratamiento como el ilustrado en la Figura 12.1. Consecuentemente, y teniendo en cuenta la discusión anterior, esta alternativa de es una buena barrera para reducir los niveles de sólidos suspendidos y en combinación con las otras etapas de tratamiento, puede coadyuvar a remover otros parámetros de importancia sanitaria que presente la fuente de agua seleccionada.

### 12.2.2 Segunda etapa de pretratamiento

La segunda etapa de pretratamiento, constituida por las diferentes alternativas de filtración gruesa descritas en los apartes 4.4.3 a 4.4.5, presentan también un buen potencial para la reducción de sólidos suspendidos. Aunque este potencial ha sido la principal razón para el desarrollo y la promoción de algunas alternativas de filtración gruesa, como la FGH (Welegin, 1986; Wegelin et al, 1991), es importante observar que estas tecnologías tienen otras

y quizá más importantes como parte de un sistema de tratamiento de agua, como se desprende del conjunto de resultados presentados en el capítulo 11 y de aquellos que se retoman en las Tablas 12.1 a 12.4 para las plantas piloto y 12.5 a 12.8 para las plantas a escala real.

En efecto, en las plantas piloto, procesando agua del río Cauca, la remoción parcial de coliformes fecales en los Periodos II a IV del estudio estuvo en el rango de 93.69 a 99.69% para las cinco alternativas de filtración en evaluación. En general, las eficiencias no fueron afectadas por los cambios de calidad del agua ni por el aumento gradual de velocidad de 0.30 a 0.60 m/h que se realizó durante la evaluación. Los valores relativamente más bajos de remoción los presentaron las alternativas de FGAC y FGHM. En el caso del FGAC, esto se explicaría por tener una longitud de lecho filtrante útil más corta (1.55 m, según Tabla 7.5) que las otras opciones, y en el caso del FGHM, que tiene una longitud de lecho filtrante semejante a las alternativas de FGAS y FGDS, la explicación podría estar en un comportamiento hidráulico más deficiente de la estructura, pues aunque estas tres alternativas presentan similares periodos teóricos de retención, la alternativa FGHM concentra su volumen  $V$  en un sólo tanque, mientras que las otras los hacen en tres unidades en serie, cada una con volumen  $V/3$ , lo cual influye positivamente en los periodos reales de retención del agua (Hudson, H.E., 1981).

Una tendencia semejante a la discutida con las remociones de coliformes fecales se observa en los resultados de otros parámetros tales como: estreptococos fecales, color real, DQO, hierro y manganeso. Aunque las capacidades de remoción varían con los diferentes parámetros, es claro que el potencial de estas tecnologías es amplio y deben especificarse según los niveles de contaminación en las fuentes, incluyendo otros factores limitantes para la etapa de tratamiento, además de los niveles de sólidos suspendidos o de turbiedad en la fuente.

Los resultados de las plantas a escala real son consistentes con los encontrados en las plantas a escala piloto, aunque con eficiencias de remoción más bajas, lo cual guarda armonía con los niveles de contaminación relativamente más bajos que presentan los ríos de ladera, fuente de agua cruda de estas plantas.

### 12.2.3 Unidades de filtración lenta en arena

Como se desprende de los resultados presentados en las Tablas 11.4 y 11.5, las eficiencias de remoción de las unidades de filtración lenta en arena (FLA) estuvieron dentro de los valores reportados por la literatura, según se revisó en el capítulo 2 en general y se resumió en la Tabla 2.2 en particular. Sin embargo, los efluentes de las etapas de pretratamiento presentaban aún valores muy altos de contaminación lo cual se reflejó en una pobre calidad de los efluentes de las unidades de FLA. Esta situación se reflejó también en la longitud promedio de las carreras de filtración que llegaron a ser tan bajas como ocho (8) días en el FLA 4 que actuaba

como control, sin etapa de filtración gruesa y 16 días en el caso del FLA 2, precedido de la unidad de FGAC.

En los Periodos II a IV, después de haber optimizado las etapas de pretratamiento, según se resumió en la Tabla 7.5, los niveles promedio de contaminación del efluente de las diferentes alternativas de filtración gruesa estuvieron dentro de los límites en que la tecnología podía producir efluentes de mejor calidad y con mayor posibilidad de cumplir con los criterios de desinfección como barrera de seguridad enunciados en el aparte 3.

En el Periodo II tanto las unidades de pretratamiento, como las unidades de FLA reiniciaron operación con los lechos recién instalados. Esta situación, junto con los mayores valores de turbiedad que presentó el agua cruda, podrían explicar los mayores promedios de turbiedad que se presentaron en las unidades de FLA, a pesar de que ellas estaban operando con velocidades más bajas.

Durante los Periodos III y IV la turbiedad promedio de entrada en las unidades FLA 1, FLA 4 y FLA 5 estuvo en el rango de 8 a 9 UNT (Ver Tabla 11.13). A pesar de lo cual los efluentes de estas unidades no alcanzaron a producir efluentes con promedios inferiores a 1 UNT que es la norma deseable de la legislación sanitaria colombiana, pero todos, incluyendo también los FLA 2 y FLA 3, estuvieron por debajo de 5 UNT, que es la norma aceptable, con desviaciones estándar en el rango de 1.7, para el FLA 1 a 4.1 para el FLA 2. En este sentido es de interés revisar la evolución de la norma en un país con mayor grado de desarrollo, como los EE.UU (Ver Tabla 12.9), donde a pesar de lo flexible del valor hasta el año de 1962, se consiguieron grandes avances en la reducción de enfermedades de origen hídrico (Craun, 1988), seguramente porque este criterio coincidió con el control de otros indicadores de calidad microbiológica y con adecuadas prácticas sanitarias. Esta evolución sustenta además la conveniencia de que requisitos más estrictos de calidad se vayan estableciendo en armonía con los avances de conocimiento y la capacidad de operación y mantenimiento de las zonas donde se vayan a aplicar.

Las unidades de FLA en las plantas a escala real recibieron turbiedades promedio en el rango de 0.7 a 4.6 UNT, con desviaciones estándar en el rango de 0.3 a 8.1 y produjeron efluentes con turbiedades promedio en el rango de 0.4 a 1.0, con desviaciones estándar en el rango de 0.1 a 0.7. Estos valores sustentan la recomendación incluida en la Tabla 2.3 que limita la turbiedad a valores de 5 UNT si se desean obtener efluentes con valores inferiores a 1 UNT (Cleasby, 1991).

TABLA 12.9

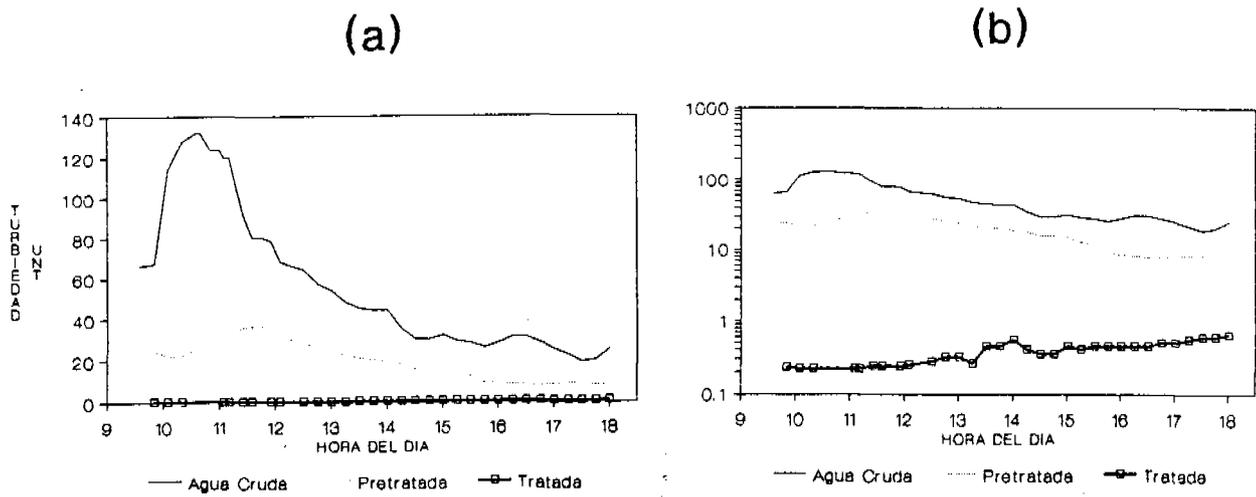
Evolución de las normas para turbiedad del agua potable en los EE.UU. (Sanks, 1987; Pontius, 1990)

PERIODO DE TIEMPO	TURBIEDAD MAXIMA PERMISIBLE
Antes de 1962	10.0 UNT
1962 a 1976	5.0 UNT
1976 a 1988	1.0 UNT
1989* al presente	Filtración lenta en arena: 1.0 UNT Filtración rápida: 0.5 UNT

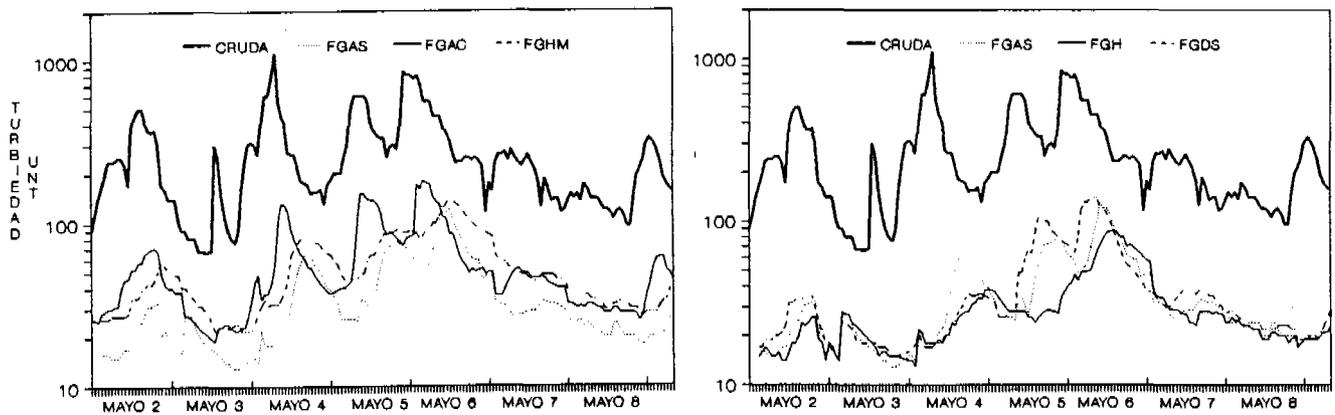
\*Las normas de 1989 indican que en ningún momento la turbiedad puede exceder 5 UNT y debe estar bajo los límites de turbiedad en el 95% de las muestras tomadas.

Durante el Proyecto se hicieron algunas observaciones sobre el comportamiento de las unidades en evaluación a los cambios bruscos de la turbiedad. En la Figura 12.3 se ilustra el impacto de un pico moderado y de corta duración. Se han utilizado ambas escalas, aritmética y logarítmica para facilitar su visualización. Aunque debió haberse muestreado algunas horas adicionales hasta tener la recuperación del efluente de las unidades de FLA, parece claro que el esquema de tratamiento en estudio puede absorber este tipo de cambios, como lo afirma la mayor parte la literatura revisada en el capítulo 2.

En las Figura 12.4 se ilustra el impacto de picos más altos y de mayor duración en el efluente de las diferentes alternativas de a escala piloto. Aunque los filtros gruesos reducen significativamente la magnitud de los picos, parece claro que ellos todavía pueden afectar negativamente el comportamiento de las unidades de FLA. Esta situación amerita optimización adicional de las etapas de pretratamiento o en lo posible, capacitar a los operadores para que en estas circunstancias se reduzca más o menos drásticamente el caudal de entrada, una práctica que se utiliza en plantas convencionales que no disponen de estructuras adecuadas de amortiguación de picos o de velocidad suficiente de respuesta para ajustar la dosificación de químicos.



**FIGURA 12.3** Comportamiento de la planta El Retiro frente a valores altos de turbiedad en el agua cruda. Julio 31 de 1991.



**FIGURA 12.4** Comportamiento de los sistemas de frente a valores altos de turbiedad en el río Cauca. Plantas piloto. Mayo 2-9 de 1991.

Las eficiencias en la remoción de coliformes fecales en las unidades de FLA a escala piloto estuvieron por encima de las dos (2) unidades en escala logarítmicas, lo cual corresponde a los mejores valores reportados en la literatura según se revisó en el capítulo 2. Aquellas unidades trabajando en combinación con las alternativas más eficientes de filtración gruesa (FGAS, FGH y FGDS) produjeron efluentes con valores promedio en el rango de 0.2 a 1.0 UFC/100 ml con desviaciones estándar en el rango de 0.3 a 2.1. Esto representa un significativo avance en la reducción del riesgo sanitario sin la dosificación de compuestos químicos y sienta bases sólidas para la aplicación de la desinfección como barrera de seguridad. Fallas en esta barrera no debe representar un mayor riesgo para los beneficiarios del sistema de tratamiento. Los efluentes de las unidades de FLA en las plantas a escala real son consistentes con los resultados a escala piloto aunque las eficiencias en tres de ellos no alcanzan las 2 unidades log, lo cual es consistente con el menor riesgo sanitario del agua pretratada.

Las eficiencias en la remoción del color real en las unidades de FLA a escala piloto estuvieron en el rango de 50 a 85% y en las unidades de FLA a escala real en el rango de 50 a 82%, todos ellos por encima de los valores más normalmente reportados en la literatura (Ver Tabla 2.3), posiblemente debido a que las pequeñas cantidades de hierro presente mejoraron la capacidad de remoción de materia orgánica (Collins et al, 1985) o a que la biomasa presente en los lechos se adaptó mejor al sustrato en una situación no estacional y con temperaturas cálidas y estables, según se discutió en el aparte 12.1.2.

Los bajos niveles de color real en los efluentes de las unidades de FLA tanto a escala piloto como a escala real, todos ellos significativamente inferiores a la norma de 15 UPC, guardan armonía con los bajos niveles de DQO reportados en el capítulo 11, la mayoría de ellos por debajo de 5 mg/l O<sub>2</sub>, límite de sensibilidad de la técnica de análisis utilizada. Estos bajos niveles de materia orgánica, deben representar un bajo riesgo de formación de subproductos indeseables en la etapa de desinfección. Este aspecto amerita estudios adicionales más específicos, de interés para comunidades que hayan superado los riesgos sanitarios asociados con indicadores de naturaleza microbiológica.

Tanto para las unidades de FLA a escala piloto, como a escala real, los niveles de hierro total y manganeso estuvieron por debajo de los valores recomendados por Di Bernardo, (1991) y Spencer et al. (1991), según se resumen en la Tabla 2.3. Todos los efluentes estuvieron dentro de las normas de calidad de agua para consumo humano (Ministerio de salud, 1983; OPS, 1987). En consecuencia, estos parámetros no deberían tener mayor influencia en la longitud de las carreras de filtración de las unidades de FLA y sus valores bajos en el efluente no causarían interferencia significativa con la desinfección como barrera de seguridad.

## **12.3 APLICACION DE LOS CONCEPTOS DE MULTIBARRERA Y DE TRATAMIENTO INTEGRADO**

Tanto la literatura revisada en el capítulo 2, como los resultados del presente Proyecto, muestran que la remoción de indicadores de calidad microbiológica es maximizada en las unidades de FLA, tercera etapa en el esquema de tratamiento que se ilustra en la Figura 12.1. También es reconocido y validado con los resultados del presente estudio, que la tecnología de FLA es generalmente muy eficiente en remover turbiedad, cuando ésta se presenta en niveles bajos, inferiores a 10 o 5 UNT y que su principal debilidad se origina en su limitación para procesar agua que de manera consistente supere estos niveles bajos de turbiedad.

Esta debilidad ha sido el factor principal que ha motivado el desarrollo y la aplicación de la tecnología de filtración gruesa, sobre la cual aún no existen adecuados criterios de selección y diseño, ni siquiera desde esta perspectiva. Las escasas experiencias reportadas con este tipo de tecnología corresponden a evaluaciones de alternativas aisladas, que dificultan consideraciones de tipo comparativo y en la mayoría de las veces no consideran parámetros diferentes a la turbiedad y eventualmente indicadores de contaminación fecal.

Los resultados de este estudio muestran claramente que además de la remoción de sólidos, la tecnología de filtración gruesa tiene un gran potencial para la aplicación del concepto de multibarrera en el mejoramiento de otros parámetros de calidad de agua. Estos resultados también sientan bases para iniciar el desarrollo de criterios orientados a racionalizar la selección, el diseño de las diferentes alternativas de filtración gruesa y su combinación con la tecnología de FLA, de acuerdo con el riesgo sanitario que presente la fuente de agua y las normas de calidad establecidas. El desarrollo de estos criterios debe hacerse en armonía con el concepto de tratamiento integrado, de tal manera que puedan optimizarse los recursos económicos que se inviertan en potabilización de agua, sin poner en riesgo la aplicación del concepto de multibarrera. A continuación se consideran algunos aspectos sobre la manera en que se aplicarán estos conceptos durante la presente experiencia y en los apartes 12.4 y 12.5 se aprovechan los resultados para desarrollar algunos criterios preliminares de selección y combinación de las etapas de filtración ilustradas en la Figura 12.1.

### **12.3.1 Plantas a escala piloto**

Durante el Periodo I no se cumplieron los conceptos en consideración debido a que la combinación de la etapas de pretratamiento (Figura 11.1) lo mismo que la longitud de los lechos filtrantes de grava y sus velocidades de operación (Tabla 7.2), resultaran inadecuados y las unidades de FLA debieron procesar calidades de agua que superaban su eficiencia de remoción. Durante el periodo IV las unidades de filtración operaron con las mismas velocidades del periodo I, pero se optimizó la etapa de acondicionamiento (Figura 7.3), se

aumentaron las longitudes de los lechos filtrantes y se redujo el tamaño de las gravas (Tabla 7.5). Los resultados en el periodo IV sustentan la viabilidad y la importancia de la aplicación de los dos conceptos en consideración.

En el periodo I y en el periodo II las unidades de FLA iniciaron operación con longitudes de lecho filtrante de 1.0 m. En los periodos III y IV, a pesar de que los lechos de las unidades de FLA ya habían sido raspados varias veces, consiguieron producir efluentes de bajo riesgo sanitario. Esto fue posible porque la combinación de todas las etapas de pretratamiento entregaron la mayor parte del tiempo agua dentro de los límites de la tecnología de FLA y la combinación de todas las etapas de filtración, alcanzaron eficiencias de remoción en armonía con el riesgo sanitario asociado a la fuente de agua cruda. En efecto, durante los periodos III y IV las eficiencias acumuladas de remoción de las diferentes líneas de tratamiento en investigación estuvieron en el rango de 99.7 a 99.9% para sólidos suspendidos, 94.4 a 97.5% para turbiedad, 77.1 a 86.8% para color real, 99.9911 a 99.9998% para coliformes fecales y 93.5 a >99.1% para hierro total.

### 12.3.2 Plantas a escala real

En la Tabla 7.7 se presenta información sobre las velocidades de operación, la longitud de los lechos y los tamaños de grava de las alternativas de filtración gruesa utilizadas en las plantas a escala real.

Aunque los resultados sustentan que en todos ellos se está cumpliendo con el concepto de multibarrera, cabe la discusión sobre la adecuada selección y especificación de las diferentes etapas de pretratamiento a la luz del concepto de tratamiento integrado. Por ejemplo, tomando como referencia el mayor riesgo sanitario asociado con el agua cruda que abastece las plantas el Colombo Británico y el Retiro y las longitudes de los lechos de sus etapas de filtración gruesa (FGDi de 0.6 m y FGAC de 1.2 m para el Colombo Británico y FGD<sub>i</sub> de 0.3 m y FGAC de 0.7 m para El Retiro) parece claro que se han sobre-especificado los pretratamientos de las plantas de Ceylán (FGAS de 2.0 m), Restrepo (HRF de 7.0 m), Javeriana (FGDi de 0.6m y FGH de 4.0 m), La Marina (FGAS de 2.0 m) y Cañas Gordas (FGDi de 0.6 m y FGAS de 1.8 m).

La situación anterior resulta ilustrativa de la importancia económica de armonizar la selección y especificación de las alternativas tecnológicas con el riesgo sanitario en la fuente, por lo cual es esencial conocer las posibilidades y limitaciones de las diferentes alternativas. El potencial de este conocimiento será aún mayor en la medida en que se entiendan los mecanismos asociados a la remoción de los diferentes parámetros de interés sanitario. Todo esto redundará en beneficio de una mejor aplicación de los conceptos en consideración.

## **12.4 COMPARACION Y SELECCION DE ALTERNATIVAS DE PRETRATAMIENTO**

Teniendo en cuenta los criterios de selección de tecnología presentados en el aparte 3.1, se realizaron comparaciones entre las diferentes alternativas de pretratamiento y se establecieron límites preliminares que permiten la selección de tecnología, considerando en esta primera aproximación solo los parámetros de turbiedad y coliformes totales. Esto se expone a continuación:

### **12.4.1 Con base en el riesgo sanitario y la eficiencia de remoción**

La comparación de las tecnologías se realizó aprovechando la gran variabilidad en la calidad del agua del río Cauca en parámetros como turbiedad y coliformes fecales. En el presente estudio se ha utilizado la metodología estadística descrita en el capítulo 9.

Los resultados se presentan en las Tablas 12.10 y 12.11, las cuales muestran que los efluentes de las alternativas FGAS, FGDS y FGH presentan diferencias mínimas significativas (DMS) menores de 1.0 UNT para valores de agua cruda hasta de 100 UNT, mientras que para valores en el rango de 100 a 150 UNT estas diferencias fueron menores a 2.9 UNT, y para valores superiores a 150 UNT sus DMS fueron inferiores a 19 UNT, presentándose una tendencia del FGH a producir mejores calidades de agua. Diferencias similares a las reportadas hasta 100 UNT fueron encontradas en los efluentes de las alternativas FGAC y FGHM, sin embargo estas fueron mayores al comparar FGAC y FGHM con las alternativas FGAS, FGDS y FGH.

En coliformes fecales, el modelo de comparación indica que las alternativas FGAS, FGAC, FGDS y FGH presentan efluentes iguales hasta con diferencias mínimas significativas inferiores a 350 UFC/100 ml cuando en el agua cruda se presentan valores hasta 50000 UFC/100 ml y que en el rango de agua cruda entre 50000 a 120000 UFC/100 ml la igualdad se presentó entre las alternativas FGAS, FGDS y FGH.

### **12.4.2 Con base en consideraciones preliminares sobre costos**

Usando la longitud de lecho filtrante como indicador de los costos de inversión, en la selección de las mejores alternativas se ven favorecidas las tecnologías de filtración ascendente en capas y en serie, así como la descendente en serie. Las alternativas de flujo horizontal se ven desfavorecidas, ya que cuentan con longitudes de lecho mayores (Tabla 7.5) que las alternativas con las cuales presentan eficiencias estadísticamente comparables de remoción, y presentan efluentes con calidades similares o inferiores (Tabla 12.10 y 12.11).

Tabla 12.10 Comparación Estadística de los sistemas de Pretratamiento para Turbiedad. Periodos II, III, IV.

Rango Agua Cruda (UNT)	PERIODO II				PERIODO III				PERIODO IV						
	Promedio Cruda y N	*Pretra-tamiento	Promedio DMS	Decisión de igualdad	Promedio Cruda y N	*Pretra-tamiento	Promedio DMS	Decisión de igualdad	Promedio Cruda y N	*Pretra-tamiento	Promedio DMS	Decisión de igualdad			
0 - 30	25.8 19	FGAS FGDS FGH FGAC FGHM	2.0 2.4 2.5 3.2 3.3	0.4	FGAS=FGDS FGDS=FGH FGHM=FGAC	25.5 104	FGAS FGH FGDS FGHM FGAC	3.9 4.0 4.6 5.3 6.2	0.2	FGAS=FGH	24.6 153	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	3.0 3.0 3.7 4.4 4.9	0.1	FGAS=FGH
30 - 50	39.5 80	FGAS FGH FGDS FGAC FGHM	4.4 5.7 6.3 7.8 8.1	0.6	FGHM=FGAC	40.4 152	FGAS FGH FGDS FGHM FGAC	5.9 6.4 6.9 9.4 12.0	0.4		38.4 122	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	5.0 5.2 5.8 7.7 9.8	0.5	FGAS=FGH
50 - 100	69.8 129	FGAS FGH FGDS FGAC FGHM	10.2 11.4 13.0 16.5 18.0	1.0		67.6 108	FGAS FGH FGDS FGHM FGAC	10.5 10.5 11.6 16.2 19.4	0.8	FGAS=FGH	70.4 71	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	12.4 13.1 13.8 19.0 21.8	0.9	FGAS=FGH FGDS=FGAS
100 - 150	122.0 43	FGAS FGH FGDS FGHM FGAC	14.6 15.9 20.0 25.4 25.9	2.6	FGAS=FGH	123 27	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	16.0 16.3 18.3 25.9 32.5	2.6	FGAS=FGH=FGDS	123 20	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	11.6 12.8 13.9 22.0 27.4	2.9	FGDS=FGAS=FGH
150 - 500	238 53	FGAS FGH FGDS FGHM FGAC	21.9 22.3 27.7 35.4 38.2	2.4	FGAS=FGH	239 21	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	20.4 23.4 23.9 36.8 49.5	5.6	FGAS=FGH=FGDS	332.0 11	FGH FGAS FGDS FGHM FGAC	19.4 26.4 34.8 55.3 83.8	19	FGDS=FGAS=FGH

N : número de datos

DMS : Diferencia Mínima Significativa

\* : Jerarquización de la prueba de Tukey, con un nivel de confiabilidad del 95%

Tabla 12.11 Comparación Estadística de los sistemas de Pretratamiento para Coliformes Fecales. Periodos II, III, IV.

Rango Agua Cruda (Ufc/100ml) (miles)	PERIODO II				PERIODO III				PERIODO IV			
	Promedio Cruda y N	*Pretra-tamiento	Promedio DMS	Decisión de igualdad	Promedio Cruda y N	*Pretra-tamiento	Promedio DMS	Decisión de igualdad	Promedio Cruda y N	*Pretra-tamiento	Promedio DMS	Decisión de igualdad
0 - 10	8476 3	FGDS FGAS FGH FGAC FGHM	19 78 160 225 292	350 FGAS=FGDS=FGH=FGAC=FGHM	6361 3	FGDS FGAS FGH FGAC FGHM	29 33 39 146 152	60 FGAS=FGDS=FGH FGAC=FGHM				
10 - 20	15164 7	FGAS FGDS FGH FGAC FGHM	10 68 101 253 322	280 FGAS=FGDS=FGH=FGAC	15051 23	FGDS FGAS FGH FGAC FGHM	35 36 65 270 351	117 FGAS=FGDS=FGH FGAC=FGHM	18182 3	FGDS FGAS FGH FGAC FGHM	69 89 125 442 491	170 FGDS=FGAS=FGH FGAC=FGHM
20 - 50	29932 8	FGAS FGDS FGH FGAC FGHM	119 186 265 313 877	279 FGAS=FGDS=FGAC=FGH	33091 17	FGAS FGDS FGH FGAC FGHM	28 29 51 344 468	113 FGDS=FGAS=FGH	22000 9	FGAS FGDS FGH FGHM FGAC	40 48 91 359 451	195 FGDS=FGAS=FGH FGAC=FGHM
50 - 120	73182 13	FGAS FGH FGDS FGAC FGHM	76 183 190 502 1283	467 FGAS=FGH=FGDS=FGAC	67200 10	FGAS FGDS FGH FGHM FGAC	60 63 147 1019 1083	981 FGAS=FGH=FGDS=FGHM	53000 9	FGDS FGAS FGH FGAC FGHM	56 64 94 533 865	311 FGDS=FGAS=FGH

N : número de datos  
DMS : Diferencia Mínima Significativa  
\* : Jerarquización de la prueba de Tukey, con un nivel de confiabilidad del 95%

Por lo anterior se descartaría la utilización de la tecnología de filtración gruesa horizontal, particularmente con tamaños de lecho filtrante menores a los especificados en la Tabla 4.1, como en el caso del FGHM, sin embargo con lecho filtrante de mayor tamaño, como en el caso la alternativa FGH su utilización parece presentar un buen potencial en fuentes con variaciones bruscas en el contenidos de sólidos suspendidos, como se observo en la Figura 12.11; en este sentido debe realizarse mas evaluación que permita verificar este potencial.

#### **12.4.3 Con base en consideraciones preliminares sobre operación y mantenimiento.**

Aunque la operación y mantenimiento de las unidades de pretratamiento no se consideraron como variables dentro del experimento, la presente discusión se realizará con base en los comentarios realizados por los operadores de las plantas piloto.

En este sentido, los operadores opinan que la alternativa mas cómoda para realizar el mantenimiento corresponde al FGAC, siguiéndole el FGAS y en tercer lugar el FGDS, adicionalmente, experiencias como las de Wegelin et al. (1991) al comparar el lavado de los FGAC con el del FGH, mostraron que las unidades de FGAC podían ser lavadas más eficientemente.

Estas consideraciones sobre operación y mantenimiento muestran de manera preliminar que las alternativas de flujo ascendente presentan un mejor potencial en el impacto del mantenimiento, sin embargo, no debe descartarse la utilización de la alternativa descendente, sin antes realizar una evaluación metódica sobre estos aspectos.

#### **12.5 CRITERIOS DE COMBINACION EN ARMONIA CON EL RIESGO SANITARIO DE LA FUENTE**

En este aparte se discutirá la utilización de las alternativas con FGAC, FGAS y FGDS precedidas por filtración gruesa dinámica y filtración lenta en arena como tratamiento final, con base en el tipo de fuente, riesgo sanitario del agua cruda, y la utilización de la desinfección como barrera de seguridad.

Es claro que aunque el riesgo sanitario presente los mismos niveles, la fuente de abastecimiento juega un papel importante para en la selección de la tecnología dado diferentes las variaciones que presentan las fuentes, dependiendo si son ríos de valle o de ladera. En el presente estudio, el río Cauca es considerado como una fuente de valle, que puede presntar niveles altos de contaminación y cambios bruscos y mas o menos sostenidos de calidad de agua, mientras que las fuentes que abastecen las plantas a escala real se consideran con diferentes niveles de

contaminación y con cambios moderados y de corta duración de la calidad de agua.

### 12.5.1 Fuente superficial de valle

Con los resultados obtenidos en las plantas piloto, operando con agua del río Cauca, fue posible revisar el criterios de turbiedad y coliformes fecales en el agua cruda que permiten el empleo de FLA en combinación con los sistemas de pretratamiento en dos etapas.

En Turbiedad, si se considera la norma de calidad de agua aceptable en la legislación sanitaria colombiana, los FLA deben proporcionar calidades de agua hasta con 5 UNT. Los sistemas de pretratamiento deben a su vez proporcionar efluentes que permitan cumplir con esta norma, en la Tabla 12.12 se presenta la información por rangos calidad afluente a las unidades de FLA de las plantas piloto y las estadísticas descriptivas de los efluentes que se produjeron con base en estos rangos de turbiedad.

Como se muestra en dicha Tabla, la calidad del agua presentó promedios entre 0.8 y 2.2 UNT en la salida de los FLA, cuando el afluente fue menor de 5 UNT, mientras que para el rango entre 5 a 10 UNT, los promedios de salida estuvieron entre 1.3 a 3.0 UNT, con valores máximos alrededor de 5 UNT, con excepción de los FLA 4 y 5 que presentaron máximos de 6.8 y 7.1 UNT durante el periodo II. Para el rango entre 10 a 15 UNT, los promedios de salida oscilaron alrededor de 5 UNT, con valores máximos por debajo de 10 UNT en todas las unidades, y en el rango mas alto (15 a 25 UNT) los promedios se mantuvieron en 5 UNT pero sus valores máximos aumentaron hasta 20 UNT.

Al considerar la norma de calidad de agua para suministro de 5 UNT para turbiedad, se recomienda utilizar el FLA con turbiedades afluentes hasta de 10 UNT, lo cual es consistente con lo referido en la literatura (Tabla 2.3).

De esta misma forma, al aceptar valores hasta 10 UNT como turbiedad promedio apropiada en el afluente de los FLA, la alternativa de FGAC precedida de FGD<sub>i</sub> podría ser empleada hasta con turbiedades de 50 UNT y velocidades de filtración menores o iguales a 0.6 m/h, como se muestra en la Tabla 12.10. Según los datos del periodo IV reportados en la Tabla 12.12, los FLA pueden aceptar afluentes hasta con 15 UNT, con lo cual la alternativa FGAS precedida de FGD<sub>i</sub>, podría tratar calidades de aguas hasta 100 UNT, con velocidades por debajo de 0.60 m/h.

Los promedios obtenidos en la alternativa con FGDS sobrepasan en unas pocas unidades el limite de 10 UNT (Tabla 12.10), en los rangos y velocidades donde cumple la alternativa FGAS. Sin embargo no se debe descartar su uso en estos rangos ya que la tecnología puede ser mejorada sustancialmente.

TABLA 12.12 Impacto de los niveles de turbiedad a la salida de los pretratamientos en el efluente de las unidades de filtración lenta en arena.

Turbiedad (UNT) afluente a las unidades de FLA	PERIODO II					PERIODO III					PERIODO IV					
	FLA 1	FLA 2	FLA 3	FLA 4	FLA 5	FLA 1	FLA 2	FLA 3	FLA 4	FLA 5	FLA 1	FLA 2	FLA 3	FLA 4	FLA 5	
	< 5	Media Std Min Max N	2.2 0.5 0.9 3.7 96	1.5 0.3 0.9 2.1 32	1.9 0.2 1.6 2.7 23	1.5 0.4 0.8 2.2 57	1.4 0.3 0.8 2.0 51	1.2 0.4 0.5 2.1 162	1.3 0.4 0.8 2.1 30	1.4 0.6 0.5 2.7 53	1.6 0.9 0.5 4.1 152	1.3 0.6 0.6 3.2 117	0.8 0.3 0.4 3.2 224	0.8 0.2 0.4 1.7 105	0.9 0.4 0.4 2.2 143	0.9 0.3 0.4 2.1 245
5 - 10	Media Std Min Max N	3.0 0.9 1.6 4.8 92	2.0 0.7 0.9 4.5 69	2.7 0.8 0.9 5.6 81	2.4 0.9 0.9 5.4 117	2.8 1.3 0.8 7.1 100	1.9 0.9 0.7 4.2 161	1.8 0.8 0.6 4.4 144	2.3 1.1 0.5 5.0 180	2.4 1.0 0.6 5.0 177	2.9 1.1 0.8 6.2 195	1.4 0.6 0.4 3.3 90	1.3 0.6 0.5 3.2 140	1.4 0.7 0.4 4.0 135	1.3 0.7 0.5 4.5 68	1.5 0.6 0.5 3.9 118
10 - 15	Media Std Min Max N	4.8 1.5 1.8 8.7 41	2.7 1.2 1.0 6.8 38	3.7 1.7 1.8 8.4 35	3.7 1.1 1.8 5.5 34	4.0 1.4 1.4 7.9 35	2.7 1.4 0.9 6.0 37	2.7 1.2 0.8 5.6 80	2.9 1.3 0.8 6.6 74	3.3 1.6 1.0 7.9 36	4.2 1.6 1.4 9.6 39	1.5 0.8 0.6 3.3 18	1.4 0.7 0.4 3.2 33	2.2 1.0 0.7 4.7 15	1.8 1.1 0.5 4.5 25	2.0 1.2 0.6 4.6 21
15 - 25	Media Std Min Max N	6.8 3.7 2.6 18.0 53	3.5 2.2 0.6 15.0 93	5.1 2.7 2.1 16.0 86	5.0 2.7 1.4 15.0 79	6.8 3.9 1.6 20.0 43	3.5 2.7 0.9 15.0 37	3.8 2.5 0.9 13.0 54	4.2 2.3 0.8 9.5 72	3.8 2.6 0.9 11.0 35	4.6 3.1 0.9 19.0 46	2.6 1.4 0.5 6.4 29	2.0 1.3 0.5 6.2 56	2.1 1.4 0.5 7.6 51	4.2 3.2 0.2 18.0 32	3.1 2.9 0.8 17.0 32

El límite propuesto para coliformes fecales a la entrada de los filtros lentos, y presentado en la Tabla 2.3, es 200 UFC/100 ml. Sin embargo, Lloyd (1991) acepta hasta 500 UFC/100 ml, teniendo la desinfección como barrera final de tratamiento. La información tomada en las plantas piloto así como en las plantas a escala real (Tablas 11.13, 11.4 y 11.19), permiten suponer que este límite podría ser un poco más alto en las condiciones del trópico. Valores promedio de hasta 767 UFC/100 ml en el afluente del FLA, produjeron promedios de salida inferiores a 1 UFC/100 ml con valores máximos de 7 UFC/100 ml. En consecuencia, el límite propuesto por Lloyd (1991) puede ser considerado como apropiado, sin embargo, la desinfección se utilizaría solamente como barrera de seguridad y no como tratamiento final.

Tomando como referencia este criterio, y según la información presentada en la Tabla 12.11, el FGAC precedido de FGD<sub>i</sub>, podría ser utilizado en el tratamiento de aguas crudas hasta con contenidos de coliformes fecales de 50000 UFC/100 ml con velocidades hasta de 0.6 m/h, mientras que las alternativas FGAS o FGDS precedido de FGD<sub>i</sub> alcanzaría 120000 UFC/100 ml con velocidades de 0.6 m/h.

La utilización del FLA en aguas crudas con promedios hasta 10 UNT y 500 UFC/100 ml podría ser utilizada sin ningún tipo de combinación, sin embargo, una estructura como el FGD<sub>i</sub> podría ser antecedida, disminuyendo los riesgos del sistema de tratamiento, sin incrementar sustancialmente los costos de inversión.

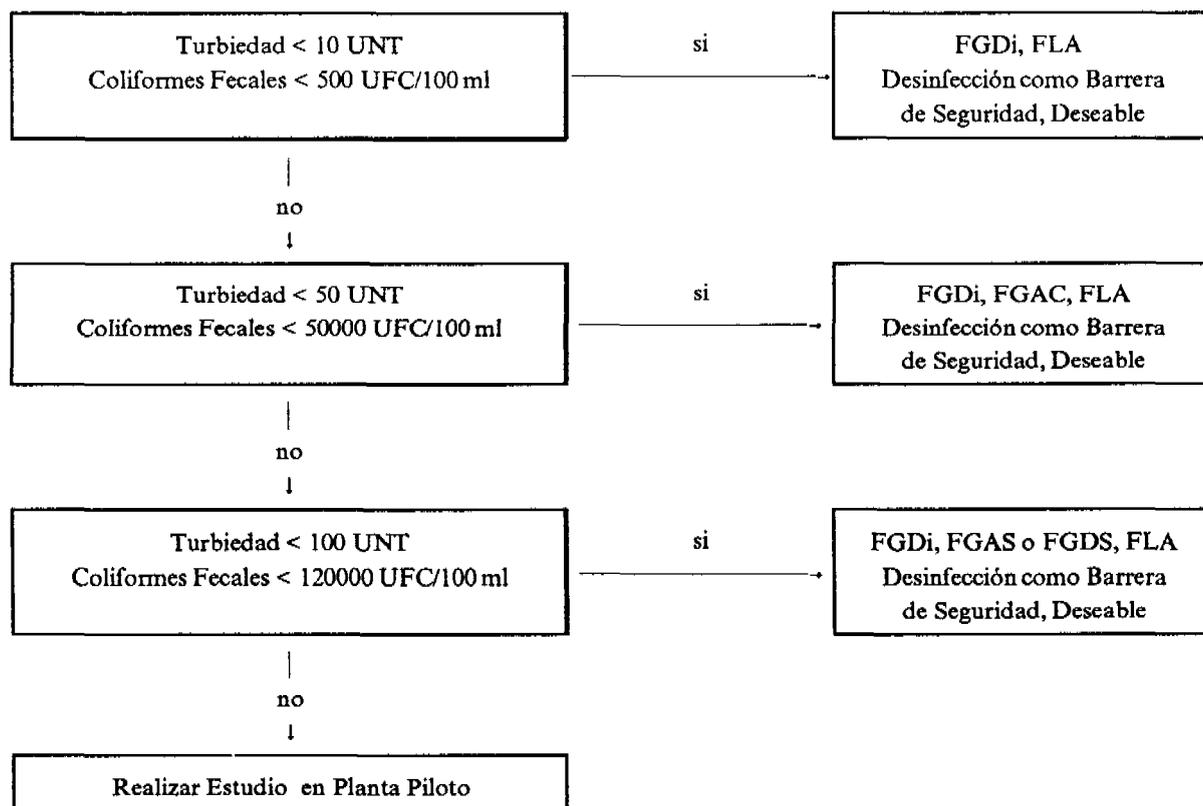
En la Figura 12.5 se presenta un diagrama preliminar para la selección de las alternativas de filtración gruesa, dependiendo del riesgo sanitario presente en el agua cruda para fuentes superficiales con características de un río de valle como el evaluado en este estudio.

#### **12.5.2 Fuentes superficiales de ladera**

El comportamiento de las plantas de demostración, claramente muestra el potencial de la combinación de tecnología de pretratamiento con filtración gruesa en dos etapas y FLA. Sin embargo como se discutió en el aparte 12.3.2, la selección de tecnología, no guarda armonía con el riesgo sanitario y los costos de construcción en los proyectos, salvo en el Retiro y Colombo Británico, donde la alternativa seleccionada (FGAC) estuvo acorde con estos criterios. Por razón, en este aparte, solo se discutirá la combinación de FGD<sub>i</sub>, FGAC y FLA para producir un efluente de bajo riesgo sanitario.

Como se presentó en la Tabla 11.19, la planta el Retiro presentó turbiedades promedio en el agua cruda de 14 UNT, con máximos que alcanzaron 110 UNT a partir de la entrada en operación de la unidad de FGD<sub>i</sub> y turbiedades promedio a la salida de los FLA de 0.6 UNT, con valores máximos de 1.1 UNT. El efluente tratado cumpliría perfectamente con la legislación sanitaria colombiana en este parámetro (5 UNT), inclusive con las normas de Estados Unidos establecidas a partir de 1989 (Tabla 12.9).

El valor máximo alcanzado en el agua cruda, corresponde a variaciones rápidas como las presentadas en la Figura 12.3, las cuales no tuvieron un gran impacto sobre la calidad del agua tratada debido a la corta duración que presentan este tipo variaciones en las fuentes de ladera evaluadas. Luego, la combinación de FGD<sub>i</sub>, FGAC y FLA podría ser utilizada en este tipo de fuente, hasta calidades de agua con valores de 100 UNT, con los criterios de lecho filtrante y velocidad de operación de la planta el Retiro (Tabla 7.7).



- (1) Los FGD<sub>i</sub>, con base en los periodos III y IV pueden operar con velocidades de 3.0 m/h
- (2) Los filtros gruesos operando con velocidades hasta 0.6 m/h.
- (3) Las longitudes de lecho filtrante utilizadas se presentan en la Tabla 7.5

**FIGURA 12.5** Diagrama preliminar para la combinación de la alternativas de pretratamiento con Filtración Lenta en arena, en fuentes superficiales de valle dependiendo del riesgo sanitario en la fuente.

Los promedios de coliformes fecales, en el efluente de las unidades de FLA en el Retiro fueron de 0.2 UFC/100 ml, con un máximo de 2 UFC/100 ml, estos representaron promedios en el agua cruda de 3978 UFC/100 ml y un máximo de 23700 UFC/100 ml (Tabla 11.19). En este sentido una recomendación para la utilización de FGD<sub>i</sub>, FGAC y FLA puede hacerse hasta

calidades de agua con 10000 UFC/100 ml, aunque parece un poco conservadora si se compara con las plantas piloto, se debe tener en cuenta el lecho filtrante del Retiro presenta menos longitud que en la planta piloto (Tablas 7.5 y 7.7).

En la Figura 12.6 se presenta el diagrama para la selección de tecnología para el caso de las fuentes superficiales de ladera.

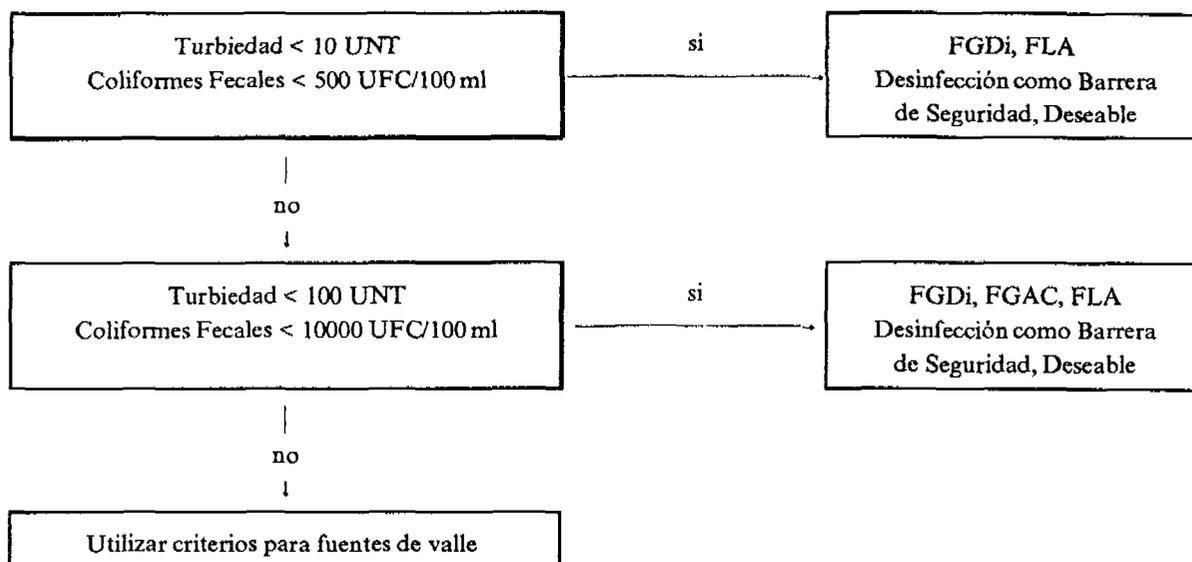
Consideraciones similares a las presentadas serán desarrolladas en el manual preliminar de diseño, operación y mantenimiento para sistemas de pretratamiento, en otros parámetros como color real, hierro total, o manganeso, como complemento a la información presentada en el presente informe.

Es importante destacar que los límites recomendados tanto para la fuente de valle como para las de ladera son preliminares, por lo tanto no debe descartarse el uso de rangos mayores y velocidades superiores a las propuestas ya que la tecnología es aun factible de optimizar dadas las altas eficiencias que presentaron las unidades a escala real y a escala piloto, especialmente durante el periodo IV. En este sentido la introducción de material filtrante mas fino, velocidades de filtración mas altas, la optimización de las labores de operación y mantenimiento y la posibilidad de disminuir de 3 a 2 el número de etapas en las alternativas en serie, pueden ser evaluadas en una nueva fase de investigación, con el fin de precisar los criterios sobre el uso de la tecnología.

## **12.6 CONCLUSIONES SOBRE COSTOS DE CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO**

Aunque el presente estudio sobre plantas de filtración de múltiples etapas se orientó principalmente a establecer la viabilidad y el potencial de las tecnologías de pretratamiento para ampliar las posibilidades de aprovechamiento de la tecnología de FLA, es importante mostrar, así sea de manera preliminar, su competitividad económica.

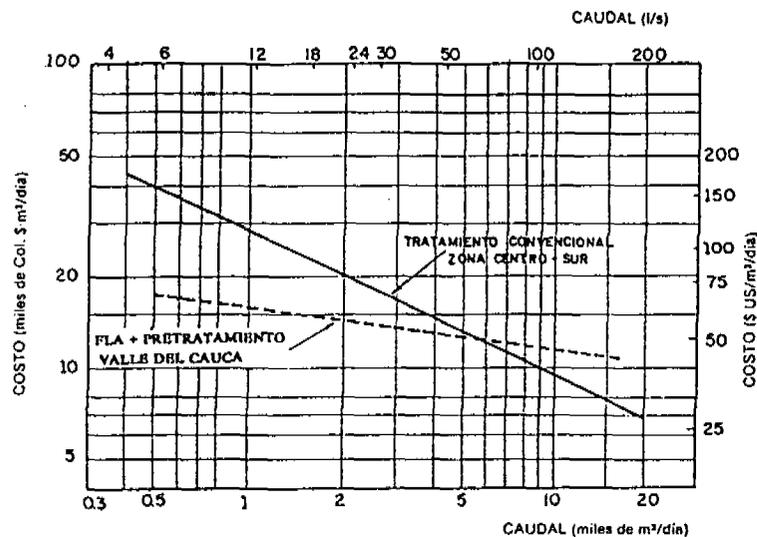
Una primera evidencia en este sentido en Colombia fué publicada por CINARA - IRC, como consecuencia del Proyecto Integrado de Investigación y Demostración en Filtración Lenta en Arena (Galvis y Visscher, 1989). Esto se ilustra en la Figura 12.7, donde las plantas con tecnología de FLA incluyendo pretratamientos resultan más económicas, en cuanto a inversión inicial, que las plantas convencionales (coagulación, floculación, decantación y filtración rápida) hasta para caudales de 6000 m<sup>3</sup>/d, equivalentes a unos 70 l/s.



- (1) Los FGD<sub>i</sub> operaron con velocidades de 1.5 m/h
- (2) Los filtros gruesos operando con velocidades hasta 0.7 m/h.
- (3) Las longitudes de lecho filtrante y los tamaños de grava corresponden a los de la planta El Retiro en la Tabla 7.7

**FIGURA 12.6** Diagrama preliminar para la combinación de la alternativas de pretratamiento con Filtración Lenta en arena, en fuentes superficiales de ladera dependiendo del riesgo sanitario en la fuente.

La Figura 12.7 se hizo con base en datos de cantidades de obra de unidades de FLA que tenían 2.15 m de altura, operando a una velocidad de filtración de 0.15 m/h y considerando un sobrecosto por administración, imprevistos y utilidad (AIU) del orden del 30%. Los costos correspondientes a estas cantidades de obra se establecieron con base en la experiencia en la zona de ladera del Valle del Cauca. Debido a que en 1987 no habían criterios claros sobre la tecnología de filtración gruesa, entonces se decidió aumentar en un 70% los costos de las unidades de FLA para tener en cuenta la necesidad de incluir pretratamientos. Para la tecnología de plantas convencionales se utilizó la información del Instituto de Fomento Municipal, INSFOPAL, para plantas de la misma capacidad localizadas en la zona centro-sur de Colombia que incluye el departamento del Valle del Cauca.



**FIGURA 12.7** Comparación de costos de inversión entre plantas convencionales y plantas con filtración lenta en arena. Colombia. 1987.

Como consecuencia de las actividades de investigación y de desarrollo de la tecnología de FLA y pretratamientos en Colombia las unidades de FLA se están diseñando con 1.85 m de altura y para la mayoría de ríos en la región andina, la combinación de FGDi + FGAC + FLA parece ser suficiente para producir agua de bajo riesgo sanitario. En estas circunstancias, las dos etapas de filtración gruesa representan en promedio el 50% de los costos de inversión en las unidades de FLA. En consecuencia con lo anterior, la situación ilustrada en la Figura 12.7 puede resultar ahora aún más favorable para la tecnología de filtración en múltiples etapas.

La situación antes enunciada, junto con el hecho de que los criterios de INSFOPAL para obtener la información sobre plantas convencionales no corresponde completamente con las utilizadas por CINARA - IRC para obtener la información sobre FLA, hacen recomendable la producción de una nueva versión de la Figura 12.7 que facilite el análisis comparativo de costos. Para obtener este tipo de gráficas se debe obtener primero la base de datos sobre cantidades de obra para las diferentes opciones tecnológicas y después se pueden obtener los costos por regiones o áreas geográficas específicas. Estas actividades se pueden desarrollar durante la segunda fase de la investigación en pretratamientos.

El nivel de los costos de inversión por habitante servido depende del riesgo sanitario en la fuente de agua, de la dotación y en menor grado del tamaño de la planta. Este costo en el Valle del Cauca es del orden de US \$ 5 - 7 por persona para un riesgo sanitario que se pueda superar con una combinación de FGDI + FGAC + FLA y con una dotación de 100 l/hab.xdía.

En los aspectos de operación y mantenimiento, la alternativa de filtración en múltiples etapas ofrece significativas ventajas sobre otras alternativas que requieren la dosificación de compuestos químicos, particularmente cuando existen limitaciones de infraestructura en

comunicaciones o de capacidad de gestión para su adquisición y adecuado almacenamiento, dosificación y control. Además, y de manera preliminar, se estima que los costos de operación y mantenimiento están del orden de un 30 a un 50 % por debajo de los que requiere la tecnología convencional. Esta información necesita ser precisada con base en la producción de bancos de datos que obedezcan a criterios claros que posibiliten análisis comparativos. Esta actividad se tiene prevista durante la fase subsiguiente del presente proyecto.

La tarifa que se paga en el valle geográfico del río Cauca, en municipios pequeños o intermedios con sistemas de abastecimiento de agua que incluyen tratamiento convencional, es del orden de 0.1 a 0.15 US \$/m<sup>3</sup>, lo cual implica un costo mensual del orden de 3 - 6 US\$ por familia promedio. Las familias de menores ingresos pagan tarifas más bajas. Esta tarifa, la cual no incluye normalmente provisión para recuperar inversión, representa del orden del 4 - 6 % de los ingresos de una familia que reciba un salario mínimo. Para la alternativa más económica de tratamiento con filtración en múltiples etapas, que motiva el presente informe, la tarifa equivalente sería del orden del 2 - 3 % y podría ser más baja si la organización comunitaria asume parte de las actividades de sostenimiento. En esta situación o en otras regiones donde el nivel de ingreso por familia supere el salario mínimo, existen muy buenas perspectivas para que la tarifa pueda incluir provisión para recuperar la inversión, manteniendo porcentajes semejantes a los antes indicados con respecto al ingreso familiar.

## 13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 13.1 CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados de la investigación claramente muestran que la combinación de la filtración lenta en arena, con dos etapas de filtración gruesa, tiene un gran potencial en la reducción del riesgo sanitario asociado con enfermedades de origen hídrico, como también de otros indicadores de calidad, importantes para su aceptación por parte de las comunidades y para aumentar la vida útil de los sistemas de abastecimiento de agua.

La experiencia del grupo de investigación con las plantas a escala piloto y de las organizaciones comunitarias con las plantas a escala real, permiten afirmar que los requerimientos de recurso humano y físico para la operación y mantenimiento de las etapas de filtración gruesa son compatibles con lo de la filtración lenta en arena. Sin embargo, esta experiencia es susceptible de ser optimizada, según consideraciones que se presentan en el aparte de recomendaciones.

La Organización Mundial de la Salud OMS y el United Nations Environment Programme UNEP han publicado (Lloyd et al., 1991) un esquema de clasificación de la calidad microbiológica del agua, con base en la concentración de coliformes fecales. En esta clasificación A = 0/100 ml; B = 1 - 10/100 ml; C = 11 - 100/100 ml; D = 101 - 1000/100 ml y E para valores > 1000/100 ml. Exceptuando la fuente de agua de la planta de Ceylán que se clasificaría como D, todas las fuentes de agua incluidas en este proyecto presentaron valores muy superiores a 1000 UFC/100 ml, que las clasificaría como E. La excelente capacidad de remoción de contaminantes demostrada por el esquema de tratamiento en desarrollo, con base en la filtración en múltiples etapas, permitió producir consistentemente efluentes A o B, sin necesidad de dosificar compuestos químicos. Esto abre claramente la posibilidad de optimizar, hasta al menos grado B (bajo riesgo sanitario) la gran mayoría de abastecimientos de agua, inclusive en regiones con limitaciones de infraestructura, de desarrollo institucional y de mano de obra calificada.

La situación anterior, junto con el potencial del esquema de tratamiento para producir efluentes con bajos niveles de turbiedad y de otros parámetros que interfieren con el proceso de desinfección, como hierro y materia orgánica, amplían significativamente la posibilidad de aplicar la desinfección terminal como barrera de seguridad, con base en dosis constantes y de baja concentración de cloro, pues este tipo de efluentes no deberían tener variaciones importantes en la demanda del desinfectante. Esto facilitaría el aprovechamiento, de manera confiable, de equipo simplificado de dosificación de cloro para un gran número de asentamientos humanos, que cuenten con el mínimo necesario de infraestructura y de desarrollo institucional y comunitario. Para este tipo de asentamiento el objetivo debería ser el abastecimiento de agua que consistentemente tenga grado A.

Aunque la desinfección terminal como barrera de seguridad para fuentes superficiales, con niveles medios y altos de contaminación, aún requiere investigación para establecer claramente sus posibilidades y limitaciones, lo que si es ahora claro es que las capacidades de remoción demostradas por las diferentes alternativas de filtración gruesa, posibilitan la eliminación de las prácticas de precloración a la entrada de las plantas de tratamiento, lo cual además de tener impacto en los costos de operación y mantenimiento, estimula la presencia de organoclorados en el sistema de distribución de agua, cuyo impacto en la salud pública son motivo de investigación y merece consideración, particularmente en aquellas regiones en que se haya venido elevando la esperanza de vida al nacer.

Las posibilidades de aplicar el concepto de multibarrera, con base en la combinación de una o más etapas de filtración gruesa con la tecnología de filtración lenta en arena, han quedado plenamente establecidas. En las plantas a escala piloto la eficiencia promedio de remoción alcanzaron valores de 5.6 unidades en escala logarítmica para coliformes fecales, 97.5% para turbiedad y 91.6% para color real. En las plantas a escala real, dependiendo del nivel de contaminación de la fuente, se alcanzaron valores de remoción en el rango de 2.7 a 4.8 unidades log. para coliformes fecales, de 80.0 a 95.7% para turbiedad y de 60 a 87% para color real. Estas eficiencias, conjuntamente con las alcanzadas por otros parámetros, como demanda química de oxígeno, hierro y manganeso, permiten afirmar que ahora la filtración lenta en arena puede aplicarse exitosamente a una mayor variedad de calidades de agua de la que antes de este estudio se creía posible.

Durante el Periodo I del estudio, las especificaciones de las etapas de pretratamiento en las plantas a escala piloto resultaron insuficientes para producir agua de bajo riesgo sanitario; durante el Periodo IV, después de haber optimizado las etapas de pretratamiento, los resultados muestran que, manteniendo los niveles de bajo riesgo sanitario en los efluentes de las plantas aún cabe la posibilidad de utilizar velocidades de filtración gruesa superiores a 0.6 m/h, que fue la evaluada tanto en el Periodo I como en el Periodo IV; el conjunto de resultados de las plantas a escala real, permiten argumentar que la selección y especificación de la mayoría de sus etapas de pretratamiento, estuvieron por encima de los requerimientos para superar los riesgos sanitarios asociados con sus diferentes fuentes de agua. Las situaciones anteriores pueden explicarse por la escasa o nula información disponible, en condiciones comparables, sobre las diferentes alternativas de pretratamiento. Esto limitó la aplicación del concepto de tratamiento integrado de agua, según el cual, establecidos o estimados los niveles de contaminación que presenta la fuente, se deben conocer las posibilidades y limitaciones de cada etapa de tratamiento, para que combinadas produzcan agua de bajo riesgo sanitario, al menor costo posible, sin poner en riesgo la confiabilidad del sistema.

Los resultados de este estudio brindan bases sólidas sobre las cuales empezar a obtener los criterios que faciliten la aplicación del concepto de tratamiento integrado de agua al aprovechamiento de la tecnología de filtración gruesa. Una visión sobre ella se presenta en el

siguiente aparte de conclusiones específicas. Ella será ampliada en el manual sobre criterios preliminares de selección, diseño, operación y mantenimiento de la tecnología de filtración gruesa, que se publicará como complemento del presente informe.

### 13.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

La tecnología de FGDi demostró que tenía potencial como primera etapa de pretratamiento, a pesar de la poca profundidad de sus lechos de grava y de sus velocidades de filtración relativamente altas. En efecto, en el rango de 1 a 3 m/h, este potencial fue mayor para los parámetros sólidos suspendidos, coliformes fecales, hierro total y manganeso. El potencial fue moderado para turbiedad y definitivamente bajo para color real. Cuando la velocidad de operación fue de 10.2 m/h, las eficiencias de remoción fueron bajas para todos los parámetros.

Las diferentes alternativas de filtración gruesa demostraron que su potencial como segunda etapa de pretratamiento no se limitaba a su capacidad para remover sólidos suspendidos o turbiedad, criterios que tradicionalmente han sido el principal motivo de su desarrollo o aprovechamiento. En efecto, las diferentes alternativas de pretratamiento presentaron buenas eficiencias de remoción para todos los parámetros, particularmente para coliformes fecales, hierro total y manganeso. Cada alternativa, independientemente, presentó eficiencias semejantes a pesar de los cambios graduales de velocidad de 0.3, 0.45 y 0.6 m/h y a los cambios de calidad de agua. Los resultados de las unidades de filtración gruesa a escala real son consistentes con los encontrados a escala piloto, aunque con menores eficiencias parciales de remoción, lo cual guarda armonía con los niveles de contaminación relativamente más bajos que presentan sus fuentes de agua cruda, los ríos de ladera.

Las eficiencias de remoción de las unidades de filtración lenta en arena (FLA) estuvieron en armonía con valores reportados en la literatura y con base a la combinación de esta tecnología, con las dos etapas de pretratamiento en filtración gruesa, estas eficiencias alcanzaron valores suficientes para producir agua de bajo riesgo sanitario de fuentes con niveles mayores de contaminación a las que podrían procesarse adecuadamente con solo unidades de FLA.

Con base en la comparación estadística de los resultados de los efluentes de la segunda etapa de pretratamiento se concluye que las alternativas FGAS, FGH y FGDS presentan eficiencias comparables de una parte y las alternativas FGAC y FGHM de otra parte. Ahora, teniendo en cuenta la mayor longitud de gravas que requieren las alternativas de filtración gruesa horizontal, se concluye también que para el rango de calidad de agua estudiados, las alternativas FGAS y FGDS de una parte y las alternativas FGAC de la otra, presentan el mayor potencial considerando tanto eficiencias como costos de inversión inicial. Si se corroboran las ventajas de mantenimiento de las alternativas de flujo ascendente sobre las alternativa de flujo descendente, entonces se podría concluir que para el rango de calidades de

agua evaluados las alternativas FGAS y FGAC tienen el mayor potencial en comparación con las otras alternativas incluidas en el presente proyecto, considerando aspectos de eficiencia, costos de inversión inicial y posibilidades de mantenimiento.

Con base en el riesgo sanitario asociado a la fuente de agua cruda seleccionada y a las eficiencias de las diferentes etapas de filtración, se debe especificar la combinación de ellas que produzca efluentes de bajo riesgo sanitario y posibilite la aplicación de la desinfección terminal, como barrera de seguridad. Con base en el análisis preliminar de resultados de las unidades a escala piloto, para los parámetros de turbiedad y coliformes fecales, se concluye que la combinación FGD<sub>i</sub>+FGAC+FLA puede utilizarse para fuentes de agua con niveles de turbiedad <50 UNT y de coliformes fecales <50000 UFC/100ml, mientras que la combinación FGD<sub>i</sub>+FGAS+FLA, se utilizaría para niveles de turbiedad <100 UNT y de coliformes fecales <120000 UFC/100ml. Consecuentemente, las velocidades de operación serían 3.0 m/h en el FGD<sub>i</sub>, 0.6 m/h en el FGAC o en el FGAS, según el caso y de 0.15 m/h en la unidad de FLA. Las longitudes de los lechos y los tamaños de las gravas serían las especificadas en la Tabla 7.5.

De manera semejante, y teniendo en cuenta que los cambios de calidad de agua en los ríos de ladera son menos pronunciados y de corta duración, se concluye con base en los resultados de las plantas a escala real, que la combinación FGD<sub>i</sub>+FLA puede utilizarse cuando los niveles de turbiedad sean <10 UNT y los coliformes fecales <500 UFC/100ml y la combinación FGD<sub>i</sub>+FGAC+FLA puede ser utilizado con niveles de turbiedad <100 UNT y de coliformes fecales <10000 UFC/100ml. En este caso, las velocidades de operación, la longitud de los lechos y los tamaños de grava serían los especificados en la Tabla 7.7 para la planta El Retiro. Sin embargo, cabe la posibilidad de ajustar estas especificaciones para otros niveles de riesgo sanitario, en la medida en que se tengan más elementos de juicio para aplicar el concepto de tratamiento integrado.

Estos criterios preliminares de selección y combinación de las etapas de filtración serán ampliados en el manual que se producirá como complemento del presente informe y de ser posible, serán consolidados con base en la fase siguiente de este proyecto de investigación.

### 13.3 RECOMENDACIONES

Los resultados del estudio en general y los obtenidos con las plantas piloto durante el Período IV en particular, dejan abierta la posibilidad de optimizar las combinaciones de las alternativas de filtración gruesa con la tecnología de FLA, con claros beneficios económicos para los países que continuarán aprovechándolos o empezarán a hacerlo en el futuro. Esta optimización se basaría en las siguientes consideraciones:

- a) Después de la introducción de la alternativa de FGD<sub>i</sub>, como etapa de acondicionamiento o primera etapa de filtración gruesa, las pérdidas de energía hidráulica se redujeron en las etapas siguientes de filtración gruesa, lo que permitió la programación mensual de la limpieza de sus lechos filtrantes.
- b) En la planta a escala real El Retiro, el cambio de sedimentación simple a FGD<sub>i</sub>, como etapa de acondicionamiento, permitió elevar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos del 10.8 al 77.5%, en la primera etapa de pretratamiento, confirmando los hallazgos con las unidades de acondicionamiento a escala piloto.
- c) Los lechos filtrantes en la segunda etapa de pretratamiento podrían especificarse con gravas más pequeñas y con programación semanal de la limpieza. Esto abre dos posibilidades: lechos más cortos, manteniendo las eficiencias del orden de las actuales o lechos con las longitudes actuales pero con mayores eficiencias de remoción.
- d) Evaluar la posibilidad de aprovechar filtros gruesos con dos unidades en serie, con la primera unidad de filtración gruesa ascendente en capas (FGAC), como una alternativa más económica de alcanzar las eficiencias que actualmente se obtienen en las alternativas de filtración gruesa en serie de tres unidades (FGAS y FGDS).
- e) En el Período IV las unidades de FLA tenían menores longitudes de lecho filtrante que en el Período I. En efecto, en este período, al igual que en el Período II, todas las unidades de FLA empezaron con 1.0 m, mientras que el Período IV, por ejemplo, el FLA 5 empezó con 0.85 m y terminó con 0.68 m y el FLA 3, empezó con 0.75 m y terminó con 0.54 m, manteniendo buenos valores de eficiencias de remoción. Consecuentemente, esto abre la posibilidad de reducir la longitud inicial de los lechos de FLA a valores inferiores a 1.0 m, que no impliquen periodos de rearenamiento inferiores a un (1) año. Actualmente estos valores son del orden de dos (2) años en las unidades a escala piloto y han alcanzado valores superiores a tres (3) años en los proyectos a escala real. Esta posible reducción en los lechos filtrantes disminuiría también los volúmenes necesarios de las casetas de almacenamiento para rearenamiento de arena, lo cual redundaría también en menores costos de inversión.

En la evaluación de las posibilidades de optimización debe incluirse también la evaluación del esquema de tratamiento propuesto a cambios bruscos de calidad de agua como, las ilustradas en la Figura 12.3 y 12.4 y discutida en el aparte 12.2.3. Estos cambios pueden ser simulados, aprovechando la infraestructura física disponible en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de Cinara en Puerto Mallarino. Esta evaluación debe incluir la posibilidad de reducir el caudal de entrada, práctica común en plantas convencionales con limitaciones de controles y equipo para ajustes rápidos de la dosificación de compuestos químicos.

Teniendo en cuenta el potencial que ofrece, el presente esquema de tratamiento para aplicar la desinfección como barrera de seguridad, lo cual permite producir de manera consistente efluentes grado A, según se definieron en el aparte 13.1, se considera importante evaluar la variación de la demanda de cloro en el efluente de las unidades de FLA, de tal manera que quede la posibilidad de utilizar equipo simplificado con dosis constantes de cloro, lo que

facilitaría su adecuado aprovechamiento por parte de operadores que tengan bajo nivel escolaridad.

Establecido en potencial de la tecnología de filtración gruesa, es importante evaluar y optimizar las prácticas actuales de operación y mantenimiento. Esto puede incluir entre otros, los siguientes aspectos:

- a) Actividades del operador frente a cambios mas o menos bruscos de calidad en la fuente de agua cruda.
- b) Posibilidades de aumentar la frecuencia de limpieza de los lechos de grava a un nivel aceptable para el operador y la organización comunitaria, lo cual permitiría reducir los costos de inversión y ampliar la cobertura de los programas de mejoramiento de la calidad de agua.
- c) Reducir el consumo de agua durante las operaciones de limpieza, lo cual es particularmente importante en regiones con escasez de agua o con captaciones por bombeo.
- d) Establecer la necesidad y las recomendaciones para la frecuencia con la que se requieran retirar, lavar y reinstalar las gravas de las unidades de filtración gruesa, con sus correspondientes guías para el operador, las organizaciones comunitarias y las instituciones. Esto además, tendría implicaciones en las dimensiones máximas de las unidades de pretratamiento para mantener los volúmenes de grava dentro de un límite que facilite las labores de los operadores y minimizar el impacto en la continuidad, cantidad o en la calidad del agua del sistema de abastecimiento.

Considerando la aplicación de los conceptos de multibarrera y de tratamiento integrado para diferentes niveles de riesgo sanitario en las fuentes de agua cruda, es importante el desarrollo de modelos de costos que faciliten la mejor selección y combinación de las diferentes etapas de filtración, cuyo potencial quedó claramente establecido durante la realización de este proyecto.

El establecimiento de los niveles de riesgo sanitario en las fuentes de agua disponibles en una región y la aplicación de los conceptos de multibarrera y de tratamiento integrado en la selección de tecnología para el diseño de plantas de tratamiento, se verían beneficiados de la existencia de programas de vigilancia de la calidad del agua, los cuales promueven actualmente la OMS a nivel mundial, la OPS a nivel americano y el Ministerio de Salud en Colombia.

Finalmente, y teniendo en cuenta las eficiencias de remoción demostradas por las tecnologías de filtración gruesa dinámica (FGDi) y de filtración ascendente en capas (FGAC), como también sus costos relativamente bajos de inversión, se considera recomendable evaluar su potencial como alternativa para eliminar la necesidad de precloración en plantas convencionales de tratamiento de agua y para reducir la dosis de coagulantes químicos. Los costos de inversión en FGDi o cuando resulte conveniente, en FGDi+FGAC, podrían verse compensados en el tiempo con el ahorro en químicos o en los costos de inversión en unidades de floculación y decantación, si la alternativa de filtración directa resulta factible después del pretratamiento con filtración gruesa. Además, la inclusión de esta(s) etapa(s) de filtración gruesa podrían

hacer más fácil de operar los sistemas de tratamiento con filtración rápida, reducir el impacto sobre el ambiente al producirse menos lodos mezclados con compuestos químicos y a hacer mucho menos probable la formación de organoclorados, si dicho pretratamiento contribuye a eliminar las necesidades de precloración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ACODAL, 1992. Revista Acodal, No 150, Santafé de Bogotá, Colombia.
2. ARBOLEDA V., J. 1973. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación de Agua. Serie técnica 13, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Perú.
3. ARBOLEDA V., J. 1986. A new Approach to Treatment Plant Desing and Construction in Latin America. Journal American Water Works Association. 78, 7, 42-105.
4. AREA DE ABASTECIMIENTO Y REMOCION DE AGUA, SERVICIO SECCIONAL DE SALUD DEL CAUCA, IRCWD/EAWAG/ETH. Estudio bocatomas de lecho filtrante y filtros dinámicos gruesos. Reporte de Progreso. Cali, Julio de 1988.
5. ARTURO H.L. 1979. Diseño Básico de Acueductos y Alcantarillados Bogotá. Colombia.
6. AWWA. 1968. Agua, su calidad y tratamiento. (Trad.: Julio Manrique). Mexico.
7. BARAS, M.E. 1987. Symphony. Guía Avanzada. Osborne/ McGraw-Hill. España.
8. BELLAMY, W.D., SILVERMAN, G.P. AND HENDRICKS, D.W 1985. Filtration of Giardia Cysts and other Substances. Vol. 2. Slow Sand Filtration. EPA-600/2-85/026. Water Engineering Reseach Laboratory, Cincinnati, Ohio. 304pp.
9. BENITEZ, N. 1988. Microbiología de la Filtración Lenta en Arena como sistema de remoción de hierro y potabilización de Agua. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
10. BURMAN, N.P. and LEWIN, J. 1961. "kimning and Situ sand washing of filters". J. Inst. Wat. E. 15, 355.
11. CANEPA, L. 1982. Filtros de Arena en Acueductos Rurales. Informe Final. Lima, Perú. CEPIS/OMS/OPS.
12. CASTILLA, A. and SMET J. E. 1989. Tilted Plate settling. Chapter 6, in: Pretreatment Methods for community water supply, IRC, The Netherlands.
13. CINARA, 1991. Documento Técnico Interno de Avance. Proyecto Integrado de Investigación y Demostración de Métodos de pretratamiento para Sistemas de Abastecimiento de Agua. Cali. Colombia.

14. CLEASBY, J.L. AND LORENCE, J.C. 1978. Effectiveness of backwashing for wastewater filters. In: Journal Environmental Engineer Division. ASCE. 104(4), 749 - 765.
15. CLEASBY, J.L.; HILMOE, D.J. AND DIMITRACOPOULUS, C.J. 1984. Slow Sand and Direct In-Line Filtration an surface Water. JAWWA. 76 (12):44
16. CLEASBY, J.L. 1991. Source Water Quality and Pretreatment Options for Slow Sand Filters. Chapter 3 in: Task Committe on Slow Sand Filtration. New York.
17. COLLINS, M.R.; EIGMY T.T. MALLEY, J.P. 1991. Evaluation Modifications to Slow Sand Filters. JAWWA.
18. CRAUN, G.F. 1988. Surface Water Supplies and Health. AWWA Journal, February. USA.
19. DNP. 1991. Agua Potable y Saneamiento Básico. Plan de Ajuste Sectorial: Segunda Fase 1991-1994. Documento DNP-2532-UDU, Santafé de Bogotá, Colombia.
20. EHRLICH, H.L. 1981. Geomicrobiology. New York. MarcelDelker, Inc.
21. ELLIS, K.V. 1985. Slow Sand Filtration. C.R.C. Critical Reviews in Enviromental Control. Department of Civil Engineering, Univesity of Technology. United Kigdom. Vol. 15. Pag. 315 - 328.
22. ELLMS, J.W. 1917. Water Purification. McGraw-Hill, New York.
23. ENGELS, C. AND POGGENBURG, W. 1989. Riverbank Filtration. Chapter. 2. In: Pretreatment Methods for Community Water Supply. IRC. The Netherlands.
24. FOX, K.R.; MILTNER, R.J; ET AL. 1984. Pilot Plant Studies of Slow Rate Filtration. JAWWA, 76 (12), 62-68.76 (12), 62-68.
25. FRANKEL, R. J. 1974, Series Filtratrion Using Local Filter Media, JAWWA, 66, 2, 124-127.
26. GALVIS, G. 1992. Innovative Tecnology for Reduction in Biological Contaminants and THM Precursors. In: The First International Conference on the Safety of Water Disinfection Balancing Chemical and Microbial Risk. Washinton.
27. GALVIS, G. y FERNANDEZ, J. 1991. Manual de diseño, operación y mantenimiento de filtros gruesos dinámicos. Versión preliminar. CINARA, Cali. Colombia.
28. GALVIS, G.; FERNANDEZ, J. AND VISSCHER J.T. 1992. Comparative Study of Different Pretreatment Alternatives. Roughing Filters for Water Treatment. Workshop in Zurich.

29. GALVIS, G. y VISSCHER, J.T. 1987. Participación y Perspectivas de la Universidad del Valle en el Desarrollo del Proyecto de Filtración Lenta en Arena (FLA). Proceedings of the International Seminar on Simple Water Treatment Tecnology. ACODAL, Cali, Colombia. August, 1987.
30. GALVIS, G., VISSCHER, J.T. 1989. Proyecto Integrado de Investigación y Demostración en Filtración Lenta en Arena. Informe Final. Versión Resumida. CINARA, Colombia/IRC, The Hague. Cali, Colombia.
31. GALVIS, G., VISSCHER, J.T., LLOYD, B. 1991. Overcoming Water Quality Limitation with the Mulbarrier Concept. A Case Study From Colombia. Slow Sand Filtration Workshop. AWWA - University of New Hamshire, Durham.
32. GERMAIN, L., COLAS, L., ROUGUET, J. 1982. Tratamiento de las aguas. Ediciones Omega S.A. Barcelona. Pag. 3 - 5.
- 33 GRAHAM, N.J.D. 1988. Slow Sand Filtration Recent Development in Water Treatment Technology. Imperial College of Science and Technology. University of London.
34. GRAYBILL, F. A. 1976. Theory and Aplication of the Linear Model. Duabury Press. Boston, Massachusetts, USA.
35. HAARHOFF, J. AND CLEASBY J.L. 1991. Biological and Physical Mechanisms in Slow Sand Filtration. Chapter 2. In: Task Committes on Slow Sand Filtration. Slow Sand Filtration. New York.
36. HABERER, K. DREWS, M. AND WALTENBERG, M. 1984. Entfernung Organischer Wasserinhaltstoffe bei der Langsamsandfiltration. Vom Wasser, 63, 121-140.
37. HAZEN, A. 1913. The Filtration of Water Public Supplies. Jhon Wiley and Sons. New York. 3rd edition.
38. HEDRICKS,D.W. AND BELLAMY, W.D. 1991. Microorganism Removals by Slow Sand Filtration. Slow Sand Filtration. New York.
39. HESPANHOL, J. 1969. Investigacao sobre o Comportamento e Aplicabilidades de Filtros Lentos no Brazil. Univeresidade de So Paulo, Facultadad e higiene e Saúde Pública. Sao Paulo, Brazil.
40. HOUGHTON. G.U. 1970. Slow Sand Filtration and Biological Processes. Advance Copy. Symposium on "Water Treatment in the Seucntico".

41. HUDSON, H.E., 1988. Water Clarification Processes. Practical Desing and Evaluation, Van Nostrand Reinhold Company, USA.
42. HUISMAN, L. 1982. Slow Sand Filtration. Delft University of Technology. Department of Sanitary Engineering.
43. HUISMAN, L. AND WOOD, W.E. 1974. Slow Sand Filtration. World Health Organization, Geneva.
44. IVES, K.J. 1957. Algae and Water Supplies, Physical Removal of Algae, Water Engineer. 61. 432.
45. JOSHI, N.S., KELKAR, P.S., ET AL. 1982. Water Quality Changes During Slow Sand Filtration. Indian Journal of Environmental Health, 24 (4) 261-266.
46. LETTERMAN, R.D. AND CULLEN T.R. 1985. Slow Sand Filter Maintenance: Cost and effects on Water Quality. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati Ohio. EPA/600/2-85/056.
47. LLOYD, B. 1974. Functional Microbial Ecology of Slow Sand Filters. Ph.D. Thesis Report. University of Surrey. Inglaterra
48. LLOYD, B., PARDON M. AND WHEELER D. 1986. Final Report on the Developmet Evaluation and Field Trials of a Small Scale Multi-stage Modular Filtration System for the Treatment of Rural Water Supplies. Rural Water Treatment Package Plant. Lima, Perú, DelAgua.
49. LLOYD, B; HELMER, R. 1991. Vigilancia y control de la calidad de agua para consumo humano en la zona rural. Publicado para la WHO y UNEP por Logman Scientific and Technical.
50. LLOYD, B; HELMER, R. 1991. Surveillance of Drinking Water Quality in Rural Areas. Published on Behalf of the World Health Organization and United Nations Enviromental Programme.
51. LONGSDON, G.S. AND FOX, K.R. 1988. Slow Sand Filtration. Recent Developments in Water Treatment Tecnology. Edited by Graham N.J.D. London England.
52. MARTINEZ, G.A. ----. Diseño de Experimentos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
53. MINISTERIO DE SALUD DE COLOMBIA, 1983. Decreto 2105 Reglamentario Parcial de la Ley 9 de 1979.

54. MONTIEL A. WELTE B. 1989. Improvement of Slow Sand Filtration. Environmental Technology Letters, Vol 10. Pg 29 - 40.
55. MONTIEL A. WELTE B. ----. La Filtration Biologique a Faible Vitesse. Dans le Monde. Mission Qualité. S.A.G.E.P.
56. MOUCHET P. 1992. From Conventional to Biological Removal of Iron and Manganese in France. J. AWWA. 158 - 167.
57. MUGELE, G.F. and WISEMAN, A. 1958. Water Treatment. London.
58. ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD OMS, 1992-1993. Guidelines for Drinking Water Quality (Documento en Preparación).
59. ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD OPS, 1987. Guías para la calidad del agua potable. Volumen 2, Criterios relativos a la salud y otra información de base. Publicación Científica No 506. Washington, DC.
60. ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD OPS, 1990. Las Condiciones de Salud en las Américas. Problemas Ambientales que Afectan a la Salud. 16pp.
61. OXOID. 1983. Culture medium catalog.
62. PALMER, C.M. 1977. Algas en Abastecimiento de Agua. Editorial Interamericana S.A. México.
63. PARDON, M. 1987. Consideraciones, Desarrollo y Evaluación de un Sistema de Tratamiento que Implementa la Filtración Gruesa de Flujo Vertical en Gravas. Lima Perú DelAgua.
64. PARDON, M. 1989. Treatment of Turbid Surface Water for Small Community Supplies. Ph.D. Thesis Report. Robens Institute, University of Surrey.
65. PONTIUS, W.P. 1990. Complying with the new Drinking Water Quality Regulation. Journal AWWA 2/1990, USA.
66. PEARSALL W.M. 1946. Freshwater Biology and Water Supply in Britain Scientific Publication N°11. F.M. Biological Association.
67. PEREZ, J., PARDON, M. LAVADO, I., VARGAS, C. 1985. Informe Preliminar de la Investigación sobre Prefiltros de Grava. CEPIS/OPS/OMS. Lima, Perú.

68. PYPHER, J.R. 1985. Slow Sand Filter and Package Treatment Plant Evaluation: Operating Cost and Removal of Bacteria Gyardia and Trihalomethanes. EPA/600/2-85-052. US Environmental Protection Agencia Cincinnati, Ohio.
69. QUIROGA, E. 1988. Estudio Preliminar Sobre Pretratamientos. Reporte Final. Univalle-CIR. Cali, Colombia.
70. REIFF, F. 1988. DEsinfecion del Agua Potable con una Mezcla de Gases Oxidantes Producidos in Situ. (Moggod). Boletin ofocina Sanitaria Panamericana, 105, 4, 371 389.
71. RIDLEY, J.E. 1967. Experience in the use of Slow Sand Filtration Double Sand Filtration and Microstraining. Prac. Soc. Water. Treat. Exam. 16, 170pp
72. ROOK, 1974. Formation of Haloforms during chlorination of Natural Water. Journal Water Treatment and Examination. 23, 2. 234.
73. SALAZAR, L. Guillermo. 1980 Agua Potable para la Zona Rural Colombiana. ACODAL No. 96. Bogotá.
74. SANKS, R.L, 1 987. Water Treatment Plant Design for the Practising Engineer. Ann arbor Science, Michigan USA
75. SAWYER C.N. AND Mc CARTY P. 1978. Chemistry for Environmental Engineering third Edition. Mc. Graw - Hill Book Company. New York.
76. SHULZ, C.R. and OKUN, D.A. 1984. "Surface Water Treatment for Communter in De:eloping Countries. New York.
77. SIMS, R.C. AND LLOYD, A.S. 1991. Slow sand Filtration: Present Practice in the Unite States. Chapter 1. In: Task Committee on Slow Sand Filtration. Slow Sand Filtration. New York.
78. SMET J.E. AND VISSCHER J.T. 1989. Pre-treatment Methods for Comunity water Supply. International Reference Centre for Comunity Water Supply and Sanitation. The Hague, The Netherlands, 173pp.
79. SMETHURST. G. 1988. Basic Water Treament for Aplication Word Wide. 2<sup>a</sup> Edición.
80. SPENCER, C; COLLINS, M. 1991. Water Quality limitations to the Slow Sand Filters. Slow Sand Filtration workshop.

81. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 1986. 16th Edition. American Public Health Association. Washington.
82. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 1989. 17th Edition. American Public Health Association. Washington.
83. STEEL, E.W. 1953, Water Supply and Sewerage , Third Edition, MacGraw- Hill, New York.
84. SUNDARESAN B.B. AND PARAMASIVAM R. 1982. National Enviromental Engineering Research Institute and international reference centre for community water supply and sanitation. 1982. Slow Sand Filtration Research and Demostratation Project - India. Final Report.
85. TASK COMMITTEE ON SLOW SAND FILTRATION, 1991. Slow Sand Fitratation. Edit by Gary S. Logsdon. Published by The American Society of Civil Engineers. 227 pp.
86. TCHOBANOGLOUS G., SCHROEDER E. 1985. Water Quality Addison. Wesley Publishing Company. E.U. 1985.
87. TOMS, L.P. AND BAYLEY, R.G. 1988. Slow Sand Filtration: and Approach to Practical Issues. Chapter of Slow Sand Filtration: Recent Developments in Water Treatment Technology. Ellis Horwood, London, England.
88. TURNEAURE, F.E. AND RUSSEL, H.L. 1940. Public water Supplies fourth edition. Jhon Willey and Sons, Inc, London.
89. VARGAS, C. 1983. Métodos Simplificados de Análisis Microbiológicos de Aguas Residuales. CEPIS, Perú. 148pp.
90. VARGAS, V. 1991. Metodología para el Manejo de Información en el Proyecto Integrado de Investigación de Metodos de Pretratamientos para Sistemas de Abastecimiento de Agua. Tesis de Grado. Facultad de Ingenierías, Universidad del Valle.
91. VISSCHER, J.T.; PARAMASIVAN, R.; RAMAN, A. AND HEIJNEM, H.A. 1987. Slow Sand Filtration for Community Water Supply. Planning, DEsing, Construction, Operation and Maintenance. Technical Paper No 24. IRC. 149pp.
92. WEGELIN, M. 1986. Horizontal Flow Roughing Filtration (HRF) Design, Construction and Operation Manual IRCWD. Report No. 06/86. Duebendorf, Swtzerland.
93. WEGELIN, M. sCHERTENLEIB R. BOLLER M. 1991. The Decade of Roughing Filters-

Development of Rural Water Treatment Process for Developing Countries, J. Water SRT-Aqua, Vol 40, n 5, Pag 304-316.

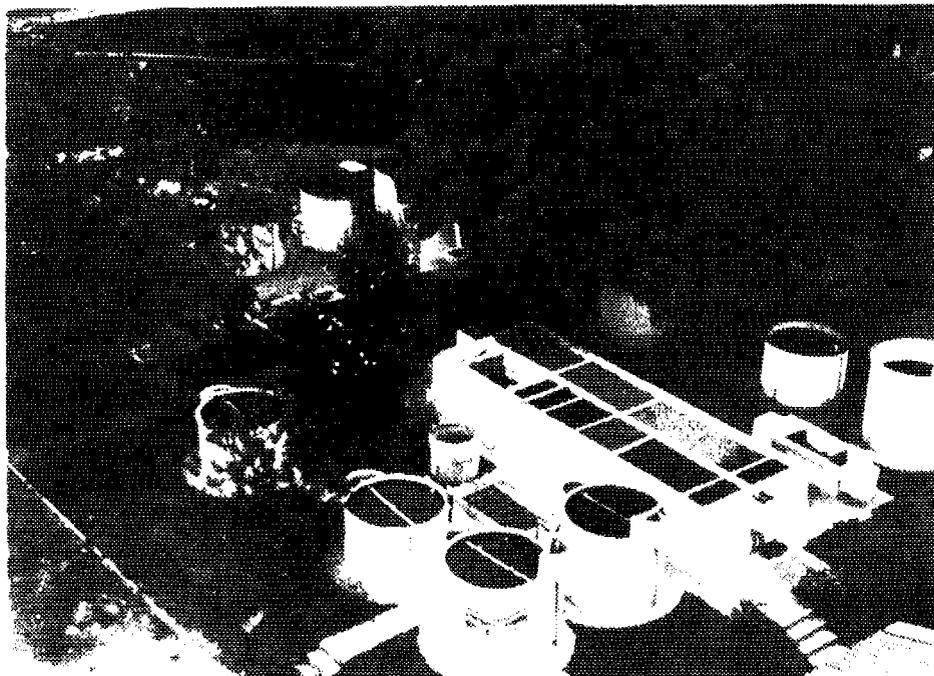
94. WHEELER, David. 1989. The Potencial Role of Slow Sand Filtration in reducing rotaviral diarrhoea in less developed countries. University of Surrey. 54, 55.
95. WHO. 1991. Guidelines for drinking water quality volume. Drinking water quality control in small community supplies. Geneva.
96. WIEDERHOLD, G. 1988. Diseño de Base de Datos. Segunda Edición, McGraw-Hill, México.
97. WILLIAMS, P.G. 1985. First Report on Slow Sand Filter Investigation. Water Sewage and effluent, 20, 33-39.
98. WILLIAMS, P.G. 1987. A study of bacteria reduction by slow sand filtration. Presentd at IWOC (South African Branch). Biennal Conference, Port Elizabeth, South Africa. 12 to 14 May, 1987.
99. WINDLE, T.E. 1974. 45th Report on Results on Bacteriological, Chemical, and Biological examination of London Water for the Years 1971-73, Metropolitan Water Board, London U.K.
100. WOLTERS, H. SMET, J.E. AND GALVIS G. 1989. Up-Flow Roughing Filtration. Chapter 8. In: Treatment Methods for Community Water Supply. IRC. The Netherlands.
101. WRC, 1977. Water Purification in the EEC. Water Research Centre State of the Art Review. Pergamon Prees New York.
102. YAO, Kuan M. 1975. "Extended plain sedimentation". Journal of the Enviromental Engineering Division ASCE. Vol. 101. No. EE3. Proc. Paper 11392. June. pp.413-423.

ANEXOS

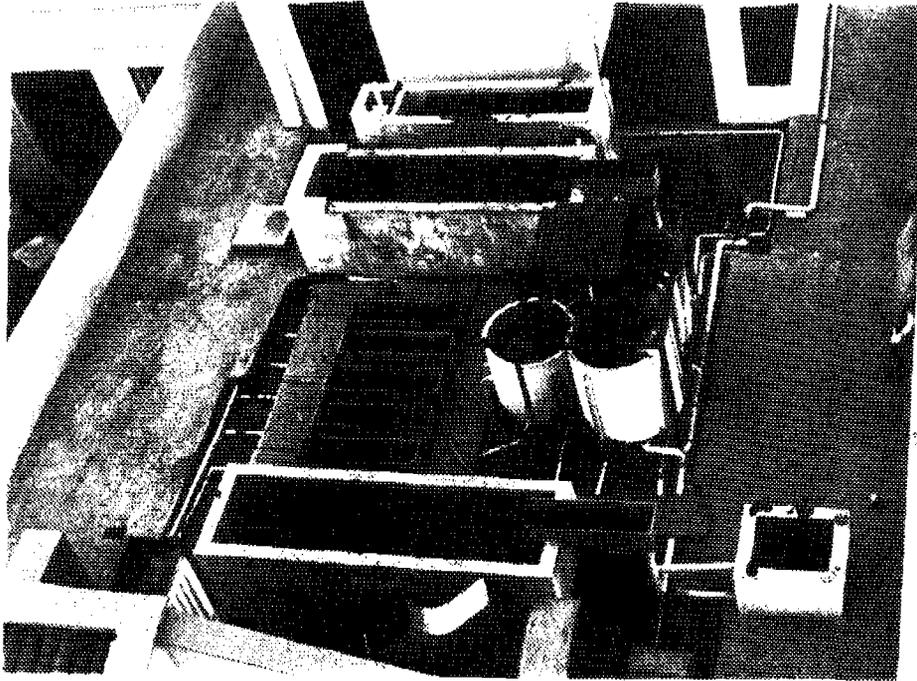
ANEXO I. ILUSTRACION DE ALGUNOS SISTEMAS DE POTABILIZACION DE AGUA QUE INCLUYEN PRETRATAMIENTO EN MEDIOS GRUESOS



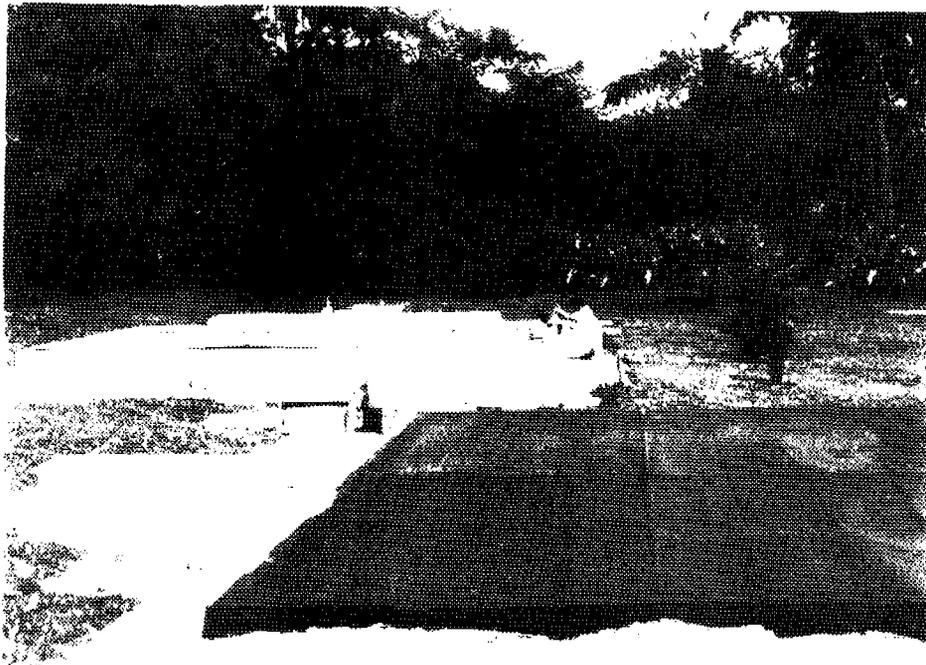
Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de CINARA, Puerto Mallarino, Cali, Colombia.



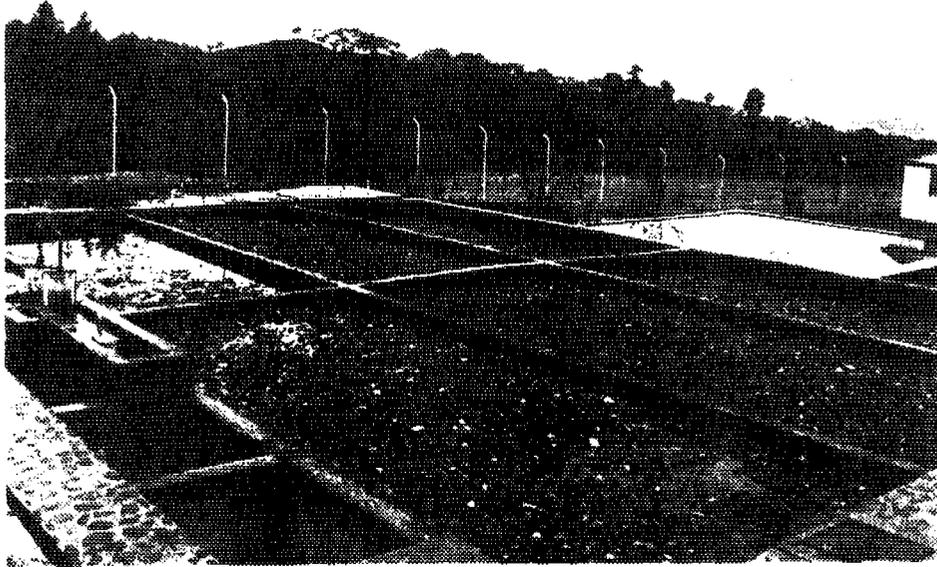
Instalaciones para la investigación de CINARA.



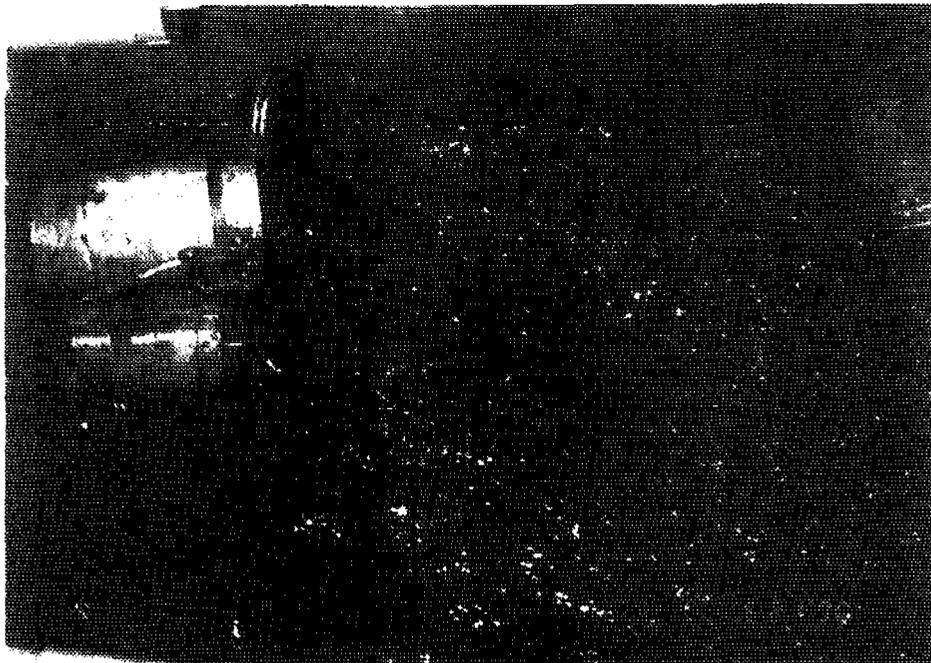
Sistemas piloto de filtración gruesa dinámica. Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología, CINARA, Cali, Colombia.



Sistema de tratamiento que incluye filtros gruesos horizontales y filtros lentos de arena (cubiertos), Universidad Javeriana, Cali, Colombia.



Sistema de tratamiento que incluye filtros gruesos ascendentes en serie y filtros lentos de arena. La Marina, Tuluá, Colombia.



Descarga de lodos de un filtro grueso ascendente en capas. Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.

## ANEXO 2 ESQUEMAS DE LAS PLANTAS A ESCALA REAL.

En este anexo se presentan los esquemas de las plantas a escala real que fueron evaluados en el presente Proyecto, ( Figuras A2.1 a A2.6) excepto el del Colegio Colombo Británico que ya fué presentado en el capítulo 7.

En cada uno de los esquemas se destacan los puntos de muestreo seleccionados para el control de la calidad de agua.

La codificación de los sitios de muestreo se realizó siguiendo el sentido del flujo de agua donde la derecha determina la línea A.

Las muestras para determinar el cloro residual en la red se toman en el tanque de almacenamiento o en diferentes sitios de la población servida.

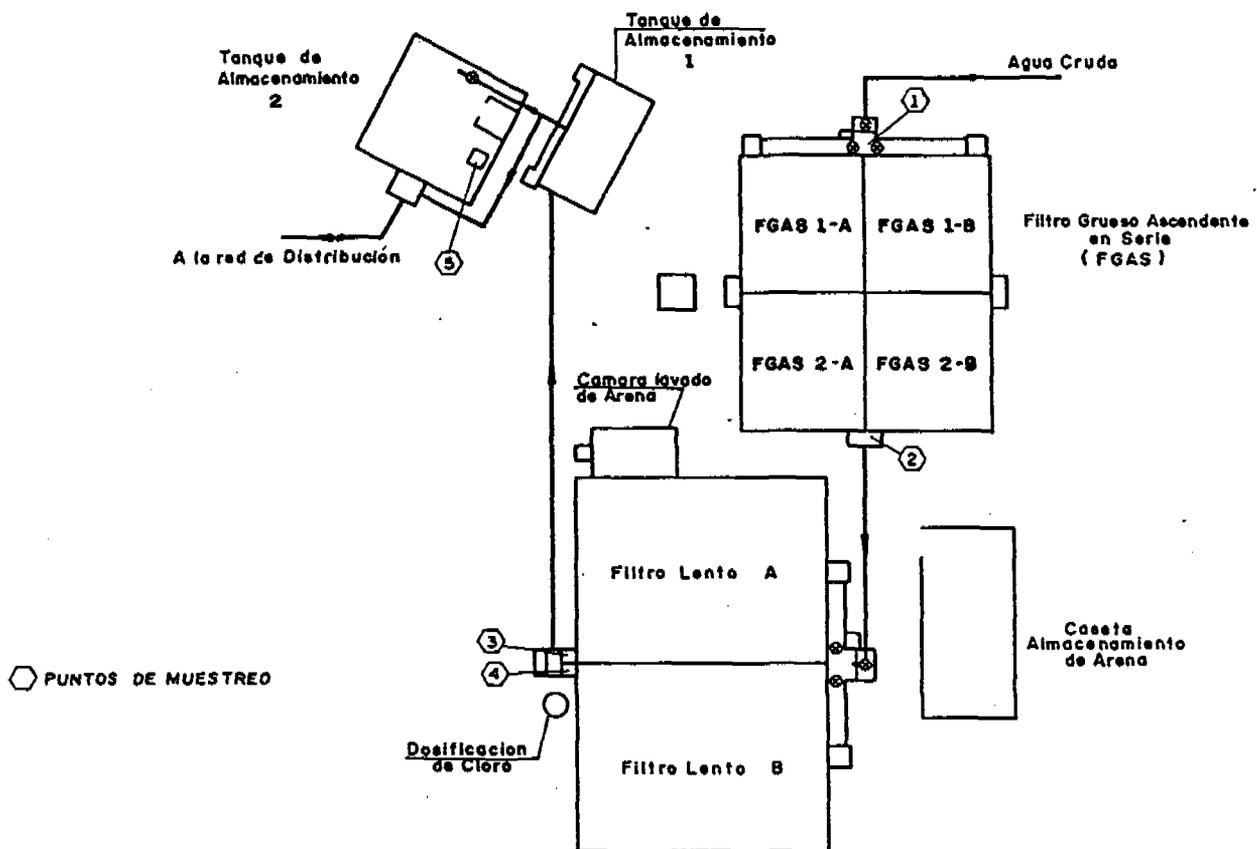


FIGURA. A2.1 Planta de Potabilización con Filtración Lenta en Arena y Filtración Gruesa Ascendente en Serie, dos Fases, y dos Lineas de Tratamiento. Ceylan-Buglagrande

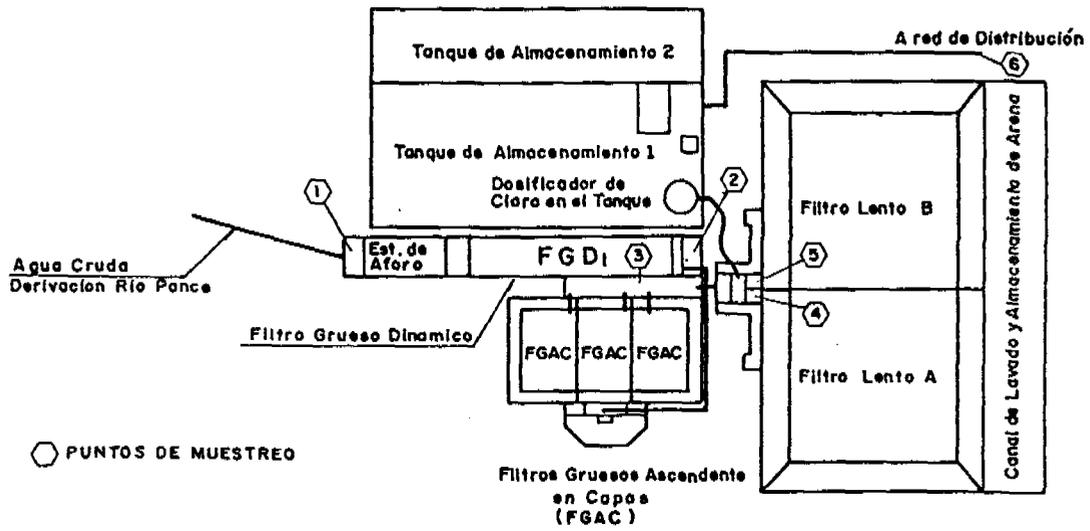


FIGURA.A2.2 Planta de Potabilización con Filtración Lenta en Arena y Filtración Gruesa Ascendente en capas, tres unidades en paralelo. El Retiro Call.

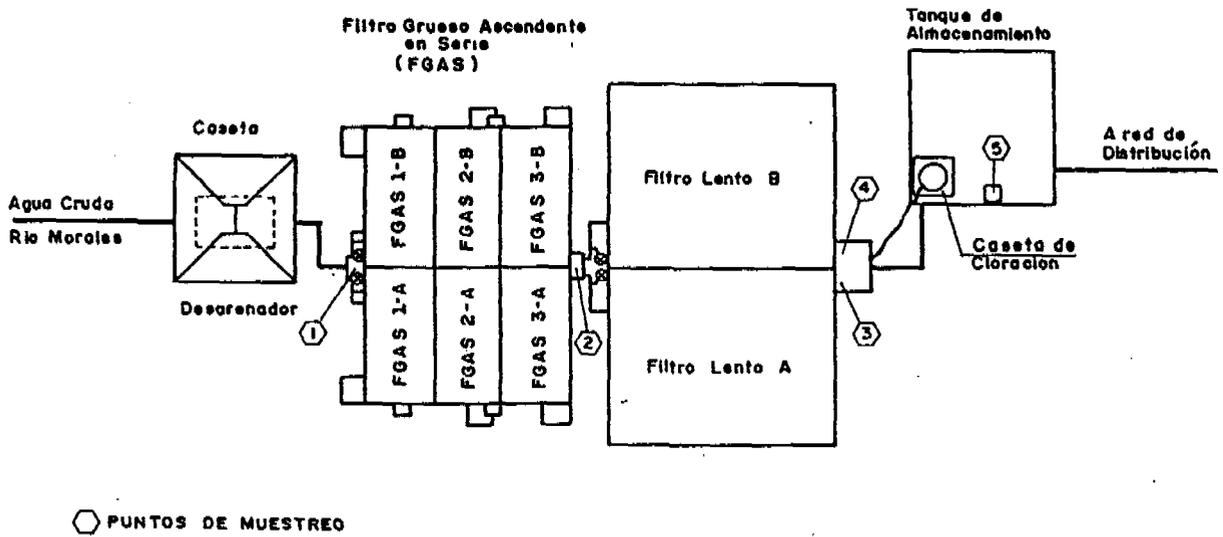


FIGURA.A2.3 Planta de Potabilización con Filtración Lenta en Arena y Filtración Gruesa Ascendente en serie, tres Fases, y dos líneas de Tratamiento. La Marina Tuluá.

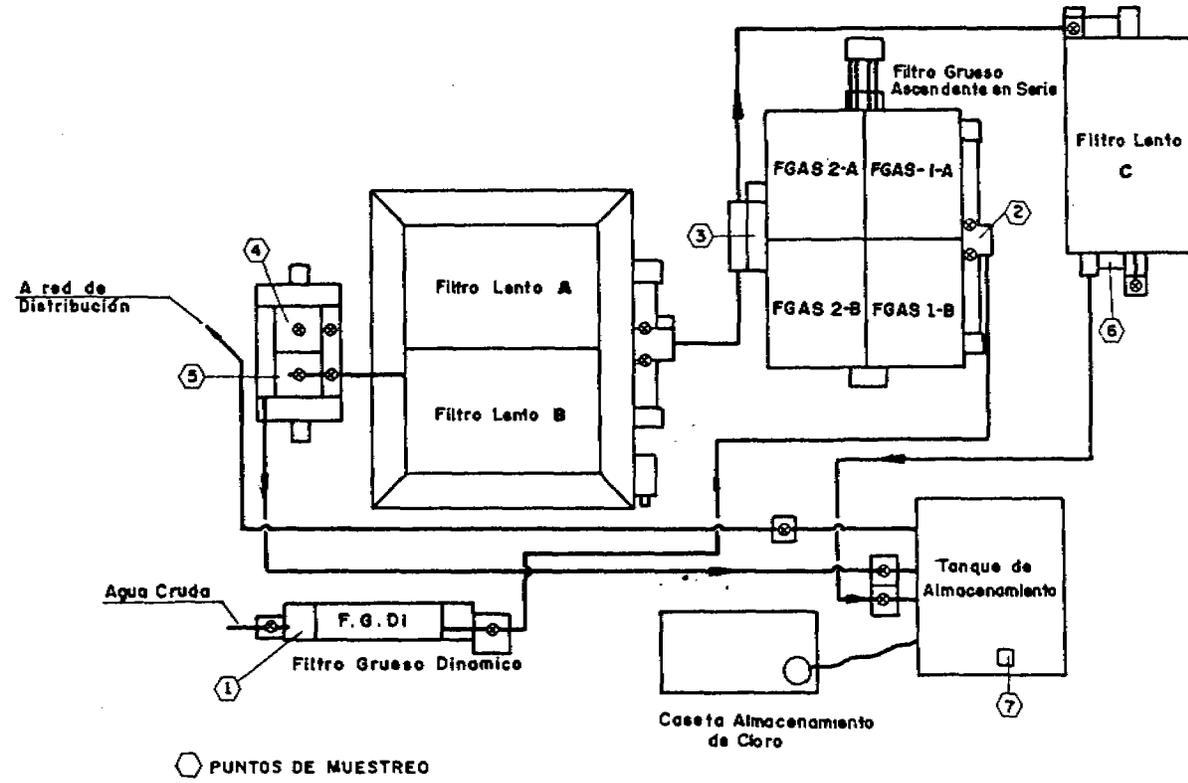


FIGURA. A2.4 Planta de Potabilización con Filtración Lenta en Arena, Filtración Gruesa Ascendente en Serie dos Fases, y Filtro Grueso Dinámico. Cañas Gordas - Cali.

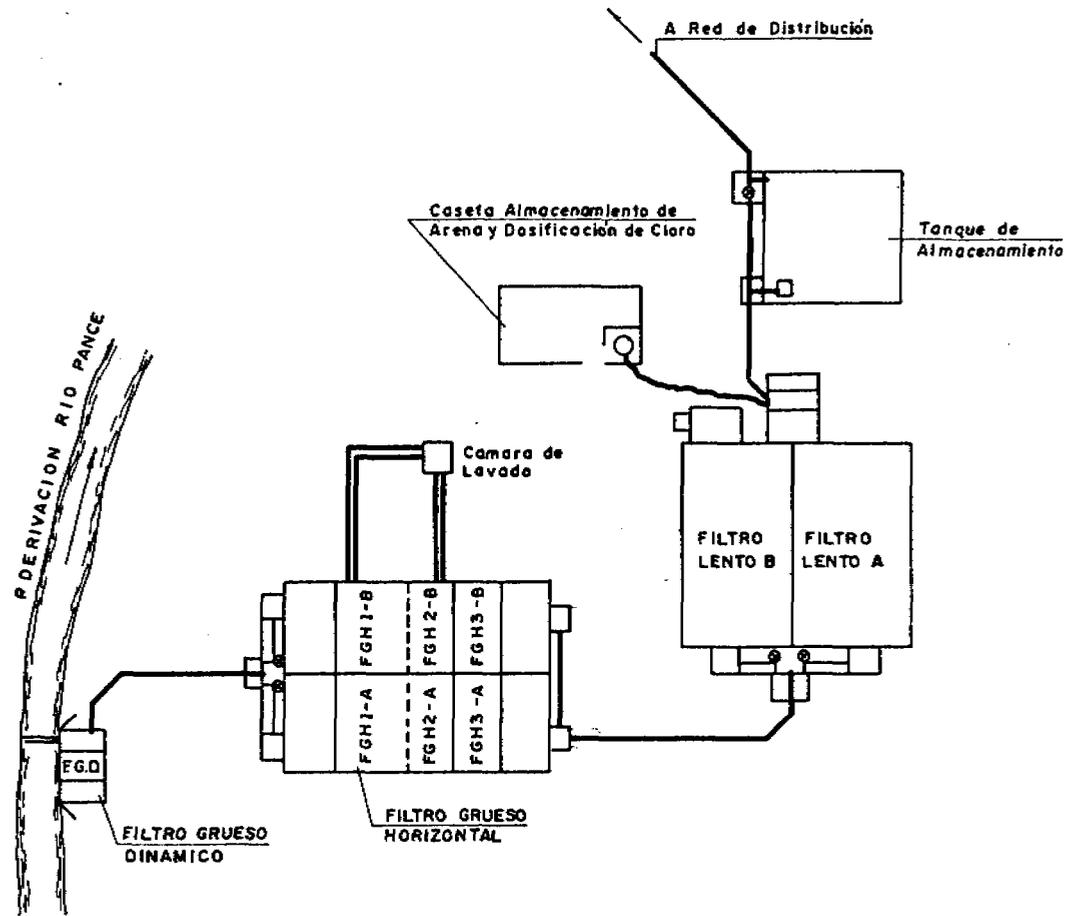


FIGURA .A.2.5 Planta de Tratamiento de Filtración Lenta en Arena con Pretratamiento en Medios Gruesos. Universidad Javeriana - Cali

A-2-5

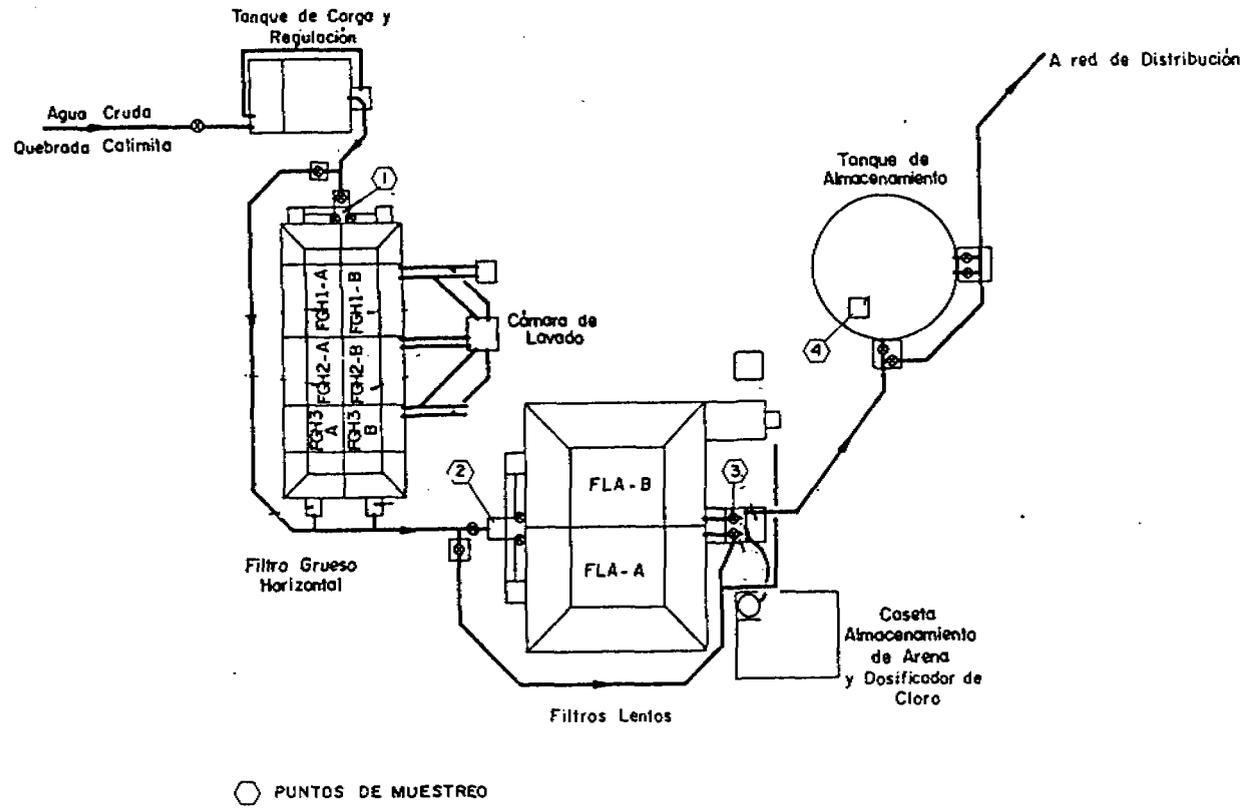


FIGURA A2.6 Planta de Tratamiento de Filtración Lenta en Arena con Pretratamiento en Medios Gruesos. CIDER-Restrepo

## **ANEXO 3 CORRELACION ENTRE LA TECNICA GRAVIMETRICA Y FOTOMETRICA PARA SOLIDOS SUSPENDIDOS**

### **1 INTRODUCCION**

El método fotométrico es una medida sencilla y directa que no requiere la filtración e ignición inicial que requiere el procedimiento gravimétrico y es muy útil cuando el contenido de sólidos es muy bajo ya que no se necesitan grandes cantidades de muestra. Varias muestras fueron determinadas simultáneamente utilizando las dos técnicas para comparar los resultados obtenidos y mostrar la ventaja de usar la técnica fotométrica. (Standard Methods, 1955).

### **2 METODOLOGIA**

Se tomaron varias muestras de agua pretratada. Se hizo el análisis de sólidos suspendidos por gravimetría. Para dos muestras diferentes se hicieron los análisis cuatro veces. Con estos valores obtenidos de sólidos suspendidos se calibró el espectrofotómetro Shimadzu UV 120-01 y se procedió a analizar las diferentes muestras por esta técnica.

### **3 RESULTADOS Y DISCUSION**

Se realizó una prueba de hipótesis estadística (t-Student) para comparar el promedio de sólidos suspendidos medido por el método gravimétrico y el promedio medido por el método fotométrico. (Ver Tabla A.3.1). En la Tabla A.3.2 se presentan las estadísticas descriptivas que se utilizaron en la prueba.

El análisis estadístico realizado permite concluir que no existen diferencias significativas entre el promedio de sólidos suspendidos medido por el método gravimétrico y el medido por el método fotométrico. La prueba estadística se realizó con un nivel de significancia del 5%, esto es, estadísticamente en promedio, la técnica gravimétrica es igual a la técnica fotométrica para el agua pretratada con una confiabilidad del 95%. Estos resultados se muestran en la Tabla A.3.2.

**TABLA A.3.1      Resultados de Sólidos Suspendidos  
(mg/l) en agua pretratada.**

<b>M E T O D O</b>	
<b>FOTOMETRICO</b>	<b>GRAVIMETRICO</b>
4.0	5.1
2.1	3.2
2.2	3.0
12.0	11.0
8.0	7.8
6.0	6.2
8.0	7.5
5.0	4.8
3.2	2.9
1.0	1.0
2.5	2.5
2.8	2.5
1.9	1.2
6.0	6.9
6.0	4.0
8.1	7.2
1.2	0.8
0.4	0.2
0.4	0.1
1.4	0.7
2.4	2.4
1.4	1.2
1.4	1.9
8.2	10.3
2.0	1.5
1.0	0.9
2.3	2.1

TABLA A.3.2

Estadísticas descriptivas de Sólidos Suspendidos (mg/l) medido por la técnica fotométrica y gravimétrica para agua pretratada

ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	Técnica Fotométrica	Técnica Gravimétrica
Media	3.7	3.7
Desv. Standard	3.0	3.1
Mínimo	0.4	0.1
Máximo	12	11
Número de datos	27	27

## ANEXO 4 MANEJO DE LA INFORMACION

En el capítulo 9 se presentó el esquema de las bases de datos de la planta piloto. En la Figura A.4.1 se presenta el esquema de las bases de datos de las plantas de demostración, la cual se dividió, como plantas del norte donde se encuentran los archivos de Restrepo, La Marina y Ceylán y plantas del sur donde se encuentran las plantas de El Retiro, La javeriana, Cañasgordas y Colombo Británico. Estas bases de datos manejan parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos e hidráulicos.

Las bases de datos se programaron en lenguaje Symphony, el cual permite intercambiar información con otros programas, transferir archivos dentro de el y con otros programas existentes dentro de el para microcomputadores.

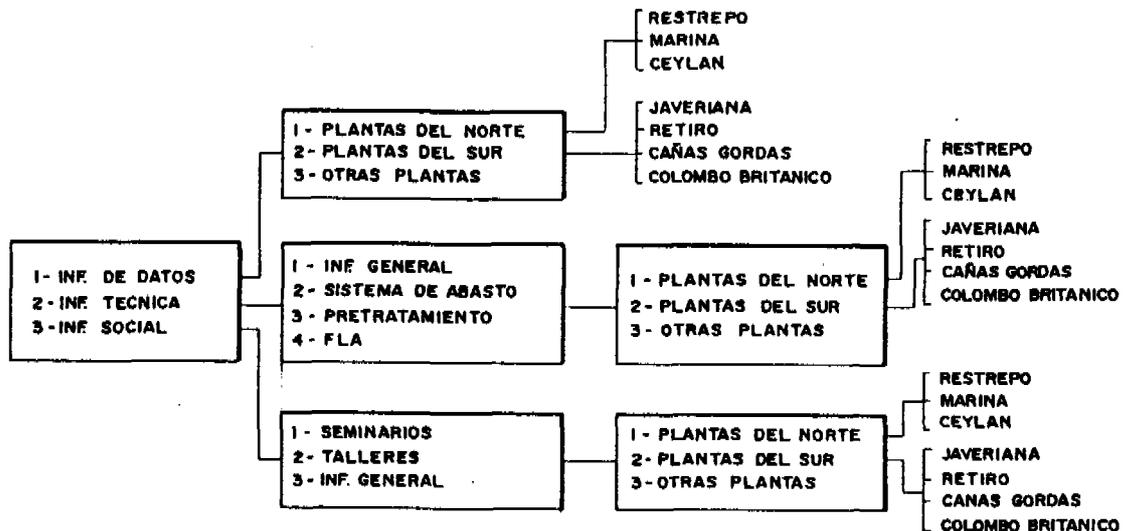


FIGURA A4.1 Esquema de Base de Datos para la Información de las Plantas a Escala Real. Proyecto Pretratamientos.

**ANEXO 5 ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS ETAPAS INTERMEDIAS DE LOS FILTROS GRUESOS DE LAS PLANTAS PILOTO (PERIODOS I A IV) Y DE LAS PLANTAS A ESCALA REAL**

Las estadísticas descriptivas de los parámetros evaluados en la etapas intermedias de las diferentes líneas de pretratamiento de las plantas piloto se presentan en las Tablas A.5.1 a A.5.3 y en Tablas A.5.4 a A.5.11 las de las plantas a escala real.

TABLA A.5.1 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Puntos Intermedios. Plantas Piloto Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo II.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1			LINEA 5		
				FGAS1	FGAS2	FGAS3	FGDS1	FGDS2	FGDS3
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	187	74	12	5.9	2.2	10.0	4.4	2.0
	Desviación	185	97	12	6.7	2.1	8.9	3.6	1.6
	Mínimo	28	9.0	1.5	0.4	0.3	1.2	0.7	0.3
	Máximo	978	545	46	33	10	37	14	6
	No. Datos	36	36	36	36	36	36	36	36
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	99	65	31	21	11	32	22	14
	Desviación	96	67	29	20	11	28	19	14
	Mínimo	20	12	4.3	2.4	1.4	3.3	2.6	1.5
	Máximo	750	500	260	190	115	260	200	140
	No. Datos	327	327	327	327	327	327	327	327
COLOR REAL (UPC)	Promedio	71	63	50	37	20	51	39	27
	Desviación	53	45	38	27	16	36	27	20
	Mínimo	18	17	11	6	3	11	8	3
	Máximo	230	210	168	120	64	159	123	90
	No. Datos	36	36	36	36	36	36	36	36
COLIFORMES FECAL (UFC/100mL)	Promedio	42658	22890	2237	665	67	4195	709	150
	Desviación	30567	31173	2519	751	94	6286	572	152
	Mínimo	7700	3000	80	8	0	200	60	17
	Máximo	117000	158000	13300	3100	390	33000	1936	780
	No. Datos	31	31	31	31	31	31	31	31
ESTREPTOCOCOS FECAL (UFC/100 mL)	Promedio	17598	9309	280	88	17	619	192	82
	Desviación	16074	6774	215	136	29	599	99	72
	Mínimo	1970	1482	40	0	0	110	72	6
	Máximo	52000	26000	820	458	98	2000	378	210
	No. Datos	9	9	9	9	9	9	9	9

TABLA A.5.2 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Puntos Intermedios. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. PERIODO III.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1			LINEA 5		
				FGAS1	FGAS2	FGAS3	FGDS1	FGDS2	FGDS3
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	102	29	7.4	3.6	1.3	6.4	3.3	1.5
	Desviación	119	44	8.5	4.4	1.4	7.8	3.8	2.1
	Mínimo	17	2.9	1.0	0.6	0.2	1.0	0.5	0.2
	Máximo	696	228	43	19	9.4	46	17	14
	No. Datos	50	50	50	50	50	50	50	50
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	59	35	20	14	8.2	20	14	9.2
	Desviación	54	35	17	12	7.0	17	11	7.3
	Mínimo	18	7.1	4.4	3.0	1.7	4.3	3.0	2.4
	Máximo	500	310	130	80	51	125	73	55
	No. Datos	412	412	412	412	412	412	412	412
COLOR REAL (UPC)	Promedio	53	46	39	32	21	40	33	24
	Desviación	29	23	21	17	11	21	18	11
	Mínimo	21	18	17	12	3	13	9	8
	Máximo	190	155	150	120	75	140	125	75
	No. Datos	50	50	50	50	50	50	50	50
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	30185	7964	1184	423	38	1163	334	38
	Desviación	21419	7107	2475	391	37	1605	263	32
	Mínimo	3800	1750	178	97	1	215	78	6
	Máximo	94000	50000	18300	2180	175	11100	1420	162
	No. Datos	53	53	53	53	53	53	53	53
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/ 100 mL)	Promedio	8262	1492	261	97	6	381	74	24
	Desviación	5294	807	241	66	2	496	26	23
	Mínimo	1600	300	37	26	4	80	46	7
	Máximo	17700	2375	703	212	10	1370	110	68
	No. Datos	5	5	5	5	5	5	5	5

TABLA A.5.3 Estadísticas Descriptivas. Parámetros Evaluados. Puntos Intermedios. Plantas Piloto. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Periodo IV.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTEG	LINEA 1			LINEA 5		
				FGAS1	FGAS2	FGAS3	FGDS1	FGDS2	FGDS3
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)	Promedio	61	14	5.3	2.8	1.1	5.3	2.7	1.2
	Desviación	34	11	3.9	2.2	0.8	3.6	2.0	0.8
	Mínimo	21	3.1	1.3	0.7	0.3	1.4	0.7	0.3
	Máximo	186	61	19	12	3.9	18	10	3.5
	No. Datos	30	30	30	30	30	30	30	30
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	52	30	19	13	6.8	19	13	7.8
	Desviación	58	40	24	16	7.2	25	17	8.2
	Mínimo	17	6.2	3.8	2.5	1.4	3.9	2.8	1.8
	Máximo	500	320	200	130	48	220	145	75
	No. Datos	377	377	377	377	377	377	377	377
COLOR REAL (UPC)	Promedio	35	30	25	21	14	26	21	16
	Desviación	12	11	10	9	7	11	9	6
	Mínimo	16	10	2	6	2	8	7	4
	Máximo	72	55	49	42	33	64	51	31
	No. Datos	30	30	30	30	30	30	30	30
COLIFORMES FECALES (UFC/100mL)	Promedio	88609	15598	2515	601	58	1955	587	61
	Desviación	66218	21965	5529	471	45	1551	418	31
	Mínimo	18182	1840	445	83	0	66	182	12
	Máximo	300000	121000	32000	2030	196	8500	1920	137
	No. Datos	30	30	30	30	30	30	30	30
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/ 100 mL)	Promedio	2763	495	62	28	4	53	41	29
	Desviación	620	265	24	12	3	23	17	12
	Mínimo	2050	200	44	12	2	30	24	14
	Máximo	3700	900	103	45	9	75	58	46
	No. Datos	4	4	4	4	4	2	2	4

TABLA A.5.4 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Ceylán. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGAS1-A	FGAS1-B	INTFGAS1	FGAS2-A	FGAS2-B	INTFGAS2	FLA-A	FLA-B	TANQUE
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	2.4			0.5			0.2	0.1	0.1	0.0
	Desviación	2.1			0.6			0.3	0.2	0.1	0.0
	Mínimo	0.0			0.0			0.0	0.0	0.0	0.0
	Máximo	8.0			2.3			1.3	0.8	0.5	0.0
	No. Datos	53			49			53	53	53	3
TURBIDIDAD (UNT)	Promedio	2.5	0.8	0.9		0.7	0.7		0.4	0.4	0.6
	Desviación	0.6	0.4	0.4		0.4	0.3		0.1	0.1	0.3
	Mínimo	0.6	0.4	0.5		0.3	0.3		0.2	0.2	0.3
	Máximo	4.6	2.2	2.1		2.0	2.0		0.9	0.8	1.5
	No. Datos	83	79	79		79	79		83	82	50
COLOR REAL (UPC)	Promedio	5			4			4	2	2	3
	Desviación	3			3			3	2	2	2
	Mínimo	1			1			1	1	0	1
	Máximo	16			16			16	8	8	8
	No. Datos	83			79			83	83	82	49
COLIFORMES FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	368			92			46	0.7	0.6	5.9
	Desviación	397			55			41	1.6	1.6	17.0
	Mínimo	46			16			4	0	0	0
	Máximo	2700			386			312	10	11	106
	No. Datos	81			78			83	79	81	49
ESTREPTOCOCCOS FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	1085			281			124	1.3	0.5	0.8
	Desviación	816			298			66	2.7	1.1	2.1
	Mínimo	196			58			25	0	0	0
	Máximo	4200			1610			350	13	5	8
	No. Datos	28			23			26	28	28	20

A-5-5

TABLA A.5.4 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración  
Ceylán. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.  
(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTFGAS1	INTFGAS2	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	98	92	92	91	95
	Desviación	22	24	25	18	17
	Mínimo	26	26	8	55	60
	Máximo	123	131	128	121	131
	No. Datos	20	16	20	20	20
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	34	30	30	26	29
	Desviación	14	11	13	12	12
	Mínimo	4	10	4	4	4
	Máximo	54	46	58	44	48
	No. Datos	18	16	18	18	18
D.O.D. (mg/l O <sub>2</sub> )	Promedio	< 6.6	< 5.5	< 5.4	< 5.0	< 5.0
	Desviación	2.4	1.4	1.1	0.0	0.0
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	13.2	10.8	8.8	5.0	5.0
	No. Datos	21	16	21	20	20
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	0.26		< 0.12	< 0.03	< 0.05
	Desviación	0.20		0.16	0.04	0.05
	Mínimo	0.03		0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.76		0.70	0.16	0.16
	No. Datos	21		20	20	20
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.08		< 0.04	< 0.03	< 0.03
	Desviación	0.04		0.03	0.03	0.04
	Mínimo	0.01		0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.16		0.12	0.12	0.18
	No. Datos	21		21	21	21

TABLA A.5.4 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Ceylán.  
Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

( Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTFGAS1	INTFGAS2	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	7.2	6.9	6.9			6.8	
	Desviación	0.9	0.8	0.8			1.3	
	Mínimo	4.4	5.0	5.1			4.2	
	Máximo	10.4	9.2	9.6			9.5	
	No. Datos	30	25	30			32	
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Promedio	37		37			39	
	Desviación	5		6			6	
	Mínimo	20		20			21	
	Máximo	44		45			46	
	No. Datos	21		21			21	
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Promedio	40		38			41	
	Desviación	15		11			11	
	Mínimo	21		20			21	
	Máximo	78		54			53	
	No. Datos	21		21			21	
pH (Unidades)	Mínimo	6.8	7.3	7.1	7.2	7.5	7.3	7.3
	Máximo	8.5	8.1	8.3	8.1	8.1	8.3	8.3
	No. Datos	30	12	30	14	14	25	20
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	19.8		19.7	20.0	19.8	19.7	20.6
	Desviación	0.9		1.0	1.4	1.4	1.3	1.0
	Mínimo	17.0		18.0	18.0	18.0	18.7	18.0
	Máximo	22.0		22.0	23.0	23.0	22.0	22.0
	No. Datos	25		12	12	12	5	20

TABLA A.5.5 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración La Marina. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGAS1-A	FGAS1-B	INTFGAS1	FGAS2-A	FGAS2-B	INTFGAS2	FGAS3-A	FGAS3-B	INTFGAS3	FLA-A	FLA-B	TANQUE
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	4.5			2.2			1.7			1.4	0.3	0.3	0.4
	Desviación	7.9			4.5			4.1			3.7	0.4	0.5	0.3
	Mínimo	0.1			0.0			0.0			0.0	0.0	0.0	0.0
	Máximo	55			31			29			27	1.7	3.2	0.7
	No. Datos	53			49			49			52	52	52	2
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	5.2	3.2	3.3		2.7	2.7		2.6	2.6		1.2	1.0	1.6
	Desviación	8.5	5.1	6.0		4.2	4.3		3.7	4.0		1.0	0.7	2.2
	Mínimo	1.0	0.4	0.4		0.5	0.4		0.4	0.4		0.4	0.4	0.4
	Máximo	64	40	30		34	35		30	30		7.4	5.0	18
	No. Datos	82	78	78		78	78		79	79		79	80	59
COLOR REAL (UPC)	Promedio	6			5			5			4	3	2	3
	Desviación	6			6			5			5	3	2	4
	Mínimo	1			1			1			1	1	1	1
	Máximo	34			33			32			32	16	15	30
	No. Datos	82			78			78			82	79	80	59
COLIFORMES FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	565			263			204			126	1.6	1.2	0.3
	Desviación	549			166			154			108	2.8	2.2	1.0
	Mínimo	30			22			42			0	0	0	0
	Máximo	3500			1130			1040			672	14	11	4
	No. Datos	80			72			74			78	77	77	60
ESTREPTOCOCCOS FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	453			166			114			64	0.9	2.7	1.5
	Desviación	1046			120			70			45	1.0	7.6	5.4
	Mínimo	38			46			36			14	0	0	0
	Máximo	6000			608			304			224	3	41	28
	No. Datos	30			26			26			30	30	29	27

TABLA A.5.5 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración La Marina  
 Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTFGAS1	INTFGAS2	INTFGAS3	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	123	108	107	108	104	101
	Desviación	16	12	10	12	13	13
	Mínimo	96	91	86	84	72	71
	Máximo	167	122	121	135	128	128
	No. Datos	19	16	16	19	19	19
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	41	34	35	33	31	27
	Desviación	13	10	14	15	17	10
	Mínimo	13	13	14	6	3	6
	Máximo	65	59	72	70	68	44
	No. Datos	17	16	16	17	16	16
D.D.O. (mg/l O <sub>2</sub> )	Promedio	< 5.9	< 5.5	< 5.4	< 5.2	< 5.0	< 5.1
	Desviación	2.0	1.1	1.1	0.7	0.1	0.4
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	13.6	8.8	8.8	8.0	5.6	6.8
	No. Datos	19	15	15	18	17	19
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	0.51			< 0.13	< 0.07	< 0.04
	Desviación	0.57			0.11	0.08	0.05
	Mínimo	0.10			0.01	0.01	0.01
	Máximo	2.59			0.36	0.30	0.21
	No. Datos	20			20	20	20
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.08			< 0.04	< 0.03	< 0.02
	Desviación	0.05			0.05	0.04	0.02
	Mínimo	0.01			0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.19			0.18	0.16	0.06
	No. Datos	20			19	19	19

A-5-9

TABLA A.5.5 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración La Marina.  
 Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTFGAS1	INTFGAS2	INTFGAS3	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	7.4	7.1	7.1	7.0	7.1	6.2	6.4	
	Desviación	1.0	1.0	0.6	1.0	1.1	1.8	2.0	
	Mínimo	3.5	3.5	6.2	3.6	5.6	3.8	4.1	
	Máximo	9.5	8.3	7.9	8.3	9.1	9.1	13.9	
	No. Datos	32	26	7	30	6	6	26	
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	62			61			63	
	Desviación	10			8			9	
	Mínimo	45			48			42	
	Máximo	82			77			79	
	No. Datos	20			20			16	
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	60			61			64	
	Desviación	16			17			16	
	Mínimo	35			32			38	
	Máximo	88			89			89	
	No. Datos	20			20			16	
pH (Unidades)	Mínimo	7.2	7.5	7.5	7.1	7.1	7.0	7.6	7.3
	Máximo	9.0	8.3	8.3	9.0	8.6	9.5	9.3	9.1
	No. Datos	33	7	4	32	17	17	25	22
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	18.4			18.4	19.5	19.8		20.5
	Desviación	1.4			1.4	1.3	1.5		1.2
	Mínimo	16.0			16.0	17.0	17.0		17.0
	Máximo	21.1			21.0	22.0	22.0		23.0
	No. Datos	31			12	11	11		28

A-5-10

TABLA A.5.6 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Cañas Gordas. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	F6Di	FGAS1-A	FGAS1-B	INTFGAS1	FGAS2-A	FGAS2-B	INTFGAS2	FLA-A	FLA-B	FLA-C	TANQUE	RED
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	9.5	6.6			4.2			2.5	0.1	0.1	0.1		
	Desviación	19	16			10			7.7	0.3	0.3	0.4		
	Mínimo	0.1	0.0			0.2			0.0	0.0	0.0	0.0		
	Máximo	126	105			59			54	1.4	1.4	2.4		
	No. Datos	52	51			40			50	52	52	52		
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	10	8.0	5.5	5.7		4.6	4.8		0.8	0.8	0.7	1.1	1.0
	Desviación	10	5.7	5.0	5.3		4.7	4.9		0.5	0.5	0.4	0.5	0.4
	Mínimo	3.4	2.9	2.4	2.3		1.9	2.0		0.3	0.3	0.3	0.4	0.5
	Máximo	75	33	26	28		27	27		2.6	2.6	2.5	2.6	1.7
	No. Datos	85	84	72	73		79	79		84	85	85	59	6
COLOR REAL (UPC)	Promedio	19	17			15			14	3	3	3	4	3
	Desviación	12	11			11			11	2	2	3	4	1
	Mínimo	5	5			3			1	1	1	1	1	1
	Máximo	51	50			49			58	8	8	16	16	5
	No. Datos	85	85			73			82	80	81	81	59	6
COLIFORMES FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	6269	4099			549			364	0.9	1.0	1.3	6.1	
	Desviación	13641	8007			646			520	2.1	2.4	2.9	28.2	
	Mínimo	260	210			22			14	0	0	0	0	
	Máximo	100000	57000			4500			3350	11	13	15	210	
	No. Datos	84	82			69			79	83	78	80	56	
ESTREPTOCOCOS FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	3242	2904			197			127	0.7	0.3	0.9	0.7	
	Desviación	9784	9577			110			79	2.1	0.7	2.1	2.4	
	Mínimo	250	130			26			12	0	0	0	0	
	Máximo	50800	50600			386			348	11	3	9	9	
	No. Datos	25	26			16			25	26	26	26	24	

A-5-11

TABLA A.5.6 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Cañas Gordas. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.  
 (Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	INTFGAS1	INTFGAS2	FLA-A	FLA-B	FLA-C
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	57	48	38	43	41	47	43
	Desviación	11	16	14	14	12	15	13
	Mínimo	40	20	24	26	17	20	24
	Máximo	75	89	68	82	60	91	86
	No. Datos	18	18	9	18	18	18	18
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	25	18	16	17	16	15	14
	Desviación	9	9	8	7	8	7	6
	Mínimo	10	5	6	3	5	0	0
	Máximo	47	33	30	32	34	25	24
	No. Datos	17	17	9	17	17	17	17
D.O.O. (mg/l O <sub>2</sub> )	Promedio	< 11.2	< 7.8	< 7.5	< 6.6	< 5.1	< 5.1	< 5.8
	Desviación	8.9	3.7	3.8	2.7	0.2	0.2	1.7
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	40.2	16.0	15.0	13.5	6.0	5.6	10.0
	No. Datos	17	17	8	17	16	17	16
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	0.74	0.68		< 0.27	< 0.09	< 0.06	< 0.07
	Desviación	0.37	0.39		0.22	0.15	0.05	0.07
	Mínimo	0.20	0.20		0.01	0.01	0.01	0.01
	Máximo	1.42	1.50		0.85	0.67	0.18	0.20
	No. Datos	18	17		18	18	18	18
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.12	0.10		< 0.05	< 0.03	< 0.02	< 0.02
	Desviación	0.04	0.04		0.03	0.04	0.02	0.02
	Mínimo	0.03	0.04		0.01	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.20	0.20		0.10	0.20	0.07	0.06
	No. Datos	18	17		18	18	18	17

A-5-12

TABLA A.5.6 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Cañas Gordas. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

( Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	INTFGAS1	INTFGAS2	FLA-A	FLA-B	FLA-C	INTFLA	TANQUE	RED
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	6.9	6.9	6.7	7.1				5.2		
	Desviación	0.6	0.8	0.9	0.8				1.3		
	Mínimo	5.5	3.8	4.9	4.5				3.2		
	Máximo	7.8	7.9	7.9	8.1				8.3		
	No. Datos	25	24	15	24				23		
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	15			14				18		
	Desviación	3			3				3		
	Mínimo	12			12				13		
	Máximo	21			21				24		
	No. Datos	17			17				15		
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	12			12				17		
	Desviación	4			4				4		
	Mínimo	8			7				11		
	Máximo	25			22				29		
	No. Datos	17			17				15		
pH (Unidades)	Mínimo	6.8	6.6	7.2	6.4	6.5	6.6	6.6	6.8	6.6	7.5
	Máximo	7.9	7.7	7.5	8.5	9.6	9.7	7.5	8.6	9.3	8.2
	No. Datos	30	18	4	28	13	12	13	21	25	2
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	21.3			22.7	23.5	23.9	23.2	22.2	22.8	23.1
	Desviación	2.5			1.6	1.0	1.2	0.9	2.4	2.2	2.1
	Mínimo	18.0			21.0	22.0	22.0	22.0	18.0	19.0	21.0
	Máximo	27.0			26.0	25.0	26.0	25.0	26.0	27.0	25.1
	No. Datos	29			10	7	7	7	8	23	2

A-5-13

TABLA A.5.7 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Colombo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGAC	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE	RED
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	9.8	3.0	1.6	0.1	0.1	0.0	0.3	0.1
	Desviación	22	5.3	4.0	0.1	0.2	0.0	0.5	0.1
	Mínimo	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Máximo	158	45	35	0.6	1.0	0.0	1.0	0.4
	No. Datos	91	91	91	84	85	6	3	6
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	12	6.2	4.3	0.6	0.6	0.6	1.1	0.5
	Desviación	15	7.8	8.1	0.4	0.4	0.2	2.2	0.4
	Mínimo	2.8	1.8	1.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.0
	Máximo	100	62	80	3.7	3.5	1.1	11	3.1
	No. Datos	123	123	123	115	116	8	22	81
COLOR REAL (UPC)	Promedio	20	17	14	4	3	1	2	3
	Desviación	15	13	13	3	3	0	2	2
	Mínimo	4	2	1	1	1	1	1	1
	Máximo	108	96	104	11	13	2	8	11
	No. Datos	123	123	123	115	116	4	22	79
COLIFORMES FECALES (UFC/100ml)	Promedio	26854	6861	767	0.4	0.5	0.0	0.6	0.2
	Desviación	33914	7408	615	1.0	1.4	0.0	1.9	0.9
	Mínimo	800	160	24	0	0	0	0	0
	Máximo	228000	54000	3700	7	7	0	8	7
	No. Datos	119	118	118	109	112	3	21	79
ESTREPTOCOCCOS FECALES (UFC/100ml)	Promedio	11242	2540	666	1.6	0.9		0.0	1.8
	Desviación	33268	3082	1041	3.4	1.8		0.0	6.8
	Mínimo	760	160	2	0	0		0	0
	Máximo	192000	15400	5232	15	7		0	34
	No. Datos	31	31	32	30	30		4	24

TABLA A.5.7 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Colombo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.  
(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGAC	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	69	54	49	47	49
	Desviación	27	18	15	18	20
	Mínimo	23	17	29	19	12
	Máximo	150	103	94	84	95
	No. Datos	19	19	19	19	19
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	27	22	23	22	23
	Desviación	14	14	11	14	16
	Mínimo	4	2	7	4	2
	Máximo	51	48	53	55	59
	No. Datos	16	17	17	16	16
D.O.D. (mg/l O <sub>2</sub> )	Promedio	< 10.9	< 7.0	< 6.4	< 5.2	< 5.3
	Desviación	6.5	2.6	2.1	0.4	0.6
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	34.0	12.2	12.0	6.4	7.2
	No. Datos	20	20	19	17	18
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	1.37	0.45	< 0.25	< 0.13	< 0.07
	Desviación	1.90	0.23	0.17	0.15	0.08
	Mínimo	0.41	0.03	0.01	0.01	0.01
	Máximo	9.20	0.82	0.70	0.57	0.31
	No. Datos	19	19	19	19	19
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.15	< 0.05	< 0.03	< 0.02	< 0.03
	Desviación	0.11	0.04	0.03	0.02	0.02
	Mínimo	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.50	0.15	0.12	0.07	0.08
	No. Datos	20	20	19	18	18

TABLA A.5.7 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Colombo.  
 Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

( Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGAC	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE	RED
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	6.7	5.8	5.7			4.9		
	Desviación	0.7	0.6	0.7			0.8		
	Mínimo	5.0	4.6	4.1			3.4		
	Máximo	8.2	6.9	7.0			6.3		
	No. Datos	28	27	28			23		
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	20		28			27		
	Desviación	12		38			19		
	Mínimo	13		12			15		
	Máximo	72		180			76		
	No. Datos	20		19			8		
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	15		14			15		
	Desviación	10		9			11		
	Mínimo	3		6			2		
	Máximo	54		50			40		
	No. Datos	20		19			8		
pH (Unidades)	Mínimo	6.6	6.2	6.0	6.2	6.2	6.4	6.8	6.4
	Máximo	8.0	8.1	7.8	7.7	7.5	8.0	8.0	7.6
	No. Datos	74	60	72	54	57	28	8	56
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	23.1	23.6	22.5	23.6	23.8	22.9	22.4	23.6
	Desviación	2.3	1.7	1.6	1.1	1.1	1.6	1.9	1.6
	Mínimo	18.0	21.0	20.0	22.0	22.0	21.0	20.0	20.0
	Máximo	28.0	27.0	26.0	26.0	27.0	26.0	26.2	27.0
	No. Datos	58	29	33	25	26	10	10	45

TABLA A.5.8 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración El Retiro. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Septiembre de 1991.

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	SED. S.	FGAC-A	FGAC-B	FGAC-C	FGACINT	FLA-A	FLA-B	TANQUE	RED
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	9.3	8.3				2.3	0.2	0.1	2.1	0.1
	Desviación	11	12				4.6	0.6	0.3	2.8	0.1
	Mínimo	0.2	0.2				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Máximo	46	64				27	4.0	1.9	6.0	0.2
	No. Datos	54	48				51	54	53	3	2
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	14	12	4.6	4.6	4.6	5.1	0.6	0.6	0.7	0.7
	Desviación	23	19	3.9	3.9	4.0	4.3	0.3	0.5	0.4	0.2
	Mínimo	4.0	3.0	1.6	1.6	1.4	2.4	0.3	0.3	0.3	0.3
	Máximo	180	150	19	19	20	18	2.3	4.2	1.8	1.8
	No. Datos	87	69	77	78	76	12	87	87	25	42
COLOR REAL (UPC)	Promedio	19	17				14	4	3	2	2
	Desviación	15	13				10	3	3	2	2
	Mínimo	4	2				1	0	0	1	1
	Máximo	100	70				55	19	13	10	12
	No. Datos	87	69				86	87	87	25	42
COLIFORMES FECALES (UFC/100ml)	Promedio	7627	5065				307	0.3	0.6	0.5	0.2
	Desviación	24829	9032				397	1.1	1.6	1.6	0.5
	Mínimo	240	220				0	0	0	0	0
	Máximo	222000	62800				2000	6	9	8	2
	No. Datos	86	66				84	83	85	24	40
ESTREPTOCOCOS FECALES (UFC/100ml)	Promedio	2222	1160				156	1.6	0.2	0.0	0.2
	Desviación	3782	1140				167	6.2	0.7	0.0	0.6
	Mínimo	104	72				20	0	0	0	0
	Máximo	16800	4100				640	28	3	0	2
	No. Datos	19	18				17	19	19	4	14

A-5-17

TABLA A.5.8 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración El Retiro. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Sept. de 1991.  
(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	SED. S.	FGACINT	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	56	45	44	34	35
	Desviación	24	21	15	17	16
	Mínimo	26	23	18	6	4
	Máximo	114	98	65	62	57
	No. Datos	12	11	12	12	12
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	26	20	19	14	17
	Desviación	14	9	9	11	10
	Mínimo	13	5	3	0	1
	Máximo	66	36	37	35	34
	No. Datos	12	11	12	12	12
D.B.O. (mg/l O <sub>2</sub> )	Promedio	< 12.9	< 9.7	< 8.5	< 6.2	< 5.5
	Desviación	8.1	5.1	4.5	2.2	1.2
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	32.0	22.0	18.0	12.0	9.0
	No. Datos	12	11	12	11	11
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	1.37	0.87	0.35	< 0.08	< 0.07
	Desviación	0.89	0.19	0.25	0.08	0.06
	Mínimo	0.41	0.61	0.02	0.01	0.01
	Máximo	3.98	1.07	0.98	0.29	0.18
	No. Datos	11	3	11	11	11
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.19	0.07	< 0.06	< 0.03	< 0.04
	Desviación	0.20	0.04	0.07	0.03	0.04
	Mínimo	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.78	0.12	0.29	0.08	0.15
	No. Datos	12	3	12	11	11

TABLA A.5.8 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración El Retiro.  
 Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Sept. de 1991.

(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	SED. S.	FGACINT	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE	RED
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	6.8	6.6	6.4	6.0	6.1	6.0		
	Desviación	0.8	1.3	0.9	1.2	1.2	1.1		
	Mínimo	5.1	5.0	4.6	4.4	4.5	4.5		
	Máximo	8.2	8.7	8.2	7.1	7.2	9.6		
	No. Datos	20	8	18	3	3	17		
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Promedio	18		19			19		
	Desviación	13		16			14		
	Mínimo	11		11			13		
	Máximo	61		73			65		
	No. Datos	12		12			12		
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Promedio	15		14			15		
	Desviación	11		10			10		
	Mínimo	8		9			11		
	Máximo	53		47			47		
	No. Datos	12		12			12		
pH (Unidades)	Mínimo	6.5	7.0	6.6	6.8	6.7	6.5	6.9	6.4
	Máximo	7.9	7.9	7.8	7.7	7.6	7.5	7.6	8.1
	No. Datos	37	13	35	20	21	19	10	24
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	21.3	23.1	22.9	22.2	22.0	20.8	21.8	22.5
	Desviación	2.3	1.2	1.5	0.9	0.7	1.4	1.6	1.9
	Mínimo	17.5	21.4	21.0	21.0	21.0	19.0	19.0	19.0
	Máximo	25.3	24.0	25.0	24.0	23.0	23.0	25.0	26.0
	No. Datos	31	3	8	9	9	5	12	14

A-5-19

TABLA A.5.9 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración El Retiro. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1991 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGAC-A	FGAC-B	FGAC-C	FSACINT	FLA-A	FLA-B	TANQUE	RED
SOLIDOS SUSPENDIDOS (sg/l)	Promedio	16	3.6				1.2	0.1	0.0		0.0
	Desviación	50	6.3				1.3	0.2	0.1		0.0
	Mínimo	0.2	0.0				0.0	0.0	0.0		0.0
	Máximo	316	37				6.4	1.0	0.8		0.1
	No. Datos	40	40				40	39	40		3
TURBIDAD (UNT)	Promedio	14	7.1	3.3	3.3	3.2	4.5	0.6	0.6		0.6
	Desviación	18	7.4	2.5	2.6	2.6	4.3	0.2	0.2		0.2
	Mínimo	3.5	2.1	1.7	1.7	1.6	2.0	0.3	0.4		0.3
	Máximo	110	38	13	13	13	19	1.1	1.2		1.2
	No. Datos	40	40	20	20	20	20	39	40		39
COLOR REAL (UPC)	Promedio	22	19				15	6	6		5
	Desviación	10	10				7	2	3		3
	Mínimo	7	3				3	1	1		1
	Máximo	56	53				37	11	12		11
	No. Datos	40	40				40	39	40		39
COLIFORMES FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	3978	1451				209	0.2	0.1	0.0	0.0
	Desviación	4867	1961				251	0.4	0.4	0.0	0.0
	Mínimo	473	120				33	0	0	0	0
	Máximo	23700	10200				1333	2	2	0	0
	No. Datos	40	40				40	39	40	1	39
ESTREPTOCOCOS FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	2455	926				139	0.1	0.0	0.0	0.0
	Desviación	2095	376				92	0.3	0.0	0.0	0.0
	Mínimo	1055	400				58	0	0	0	0
	Máximo	8100	1500				376	1	0	0	0
	No. Datos	9	9				9	9	9	1	8

TABLA A.5.9 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración El Retiro. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1991 a Julio de 1992.  
(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGACINT	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	60	48	44	44	46
	Desviación	21	10	9	11	12
	Mínimo	36	34	29	26	27
	Máximo	106	65	54	59	69
	No. Datos	7	7	7	7	7
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	29	26	24	21	22
	Desviación	2	4	4	5	6
	Mínimo	24	19	19	15	12
	Máximo	31	29	27	29	29
	No. Datos	5	5	5	5	5
D.O.G. (mg/l O2)	Promedio	< 8.7	< 6.5	< 6.2	< 5.6	< 5.0
	Desviación	2.7	2.8	2.6	1.3	0.0
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	14.4	13.6	12.4	8.8	5.0
	No. Datos	8	8	7	7	6
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	0.57	0.29	0.15	< 0.03	< 0.06
	Desviación	0.13	0.18	0.08	0.03	0.10
	Mínimo	0.32	0.11	0.04	0.01	0.01
	Máximo	0.76	0.70	0.30	0.09	0.30
	No. Datos	7	7	7	7	7
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.11	< 0.06	< 0.03	< 0.02	< 0.01
	Desviación	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01
	Mínimo	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.18	0.12	0.05	0.03	0.03
	No. Datos	8	8	8	8	8

TABLA A.5.9 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración El Retiro.  
 Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1991 a Julio de 1992.

(Continuación)

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGACINT	FLA-A	FLA-B	INTFLA	RED
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	7.0	6.9	6.7	5.5	5.8	5.6	
	Desviación	0.5	0.5	0.4	0.4	0.2	0.4	
	Mínimo	5.9	5.9	5.8	5.0	5.5	5.2	
	Máximo	7.5	7.4	7.3	6.0	6.0	6.2	
	No. Datos	9	9	9	4	4	5	
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	17		17			17	
	Desviación	3		4			5	
	Mínimo	14		12			13	
	Máximo	22		23			25	
	No. Datos	9		9			5	
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	12		12			13	
	Desviación	5		4			4	
	Mínimo	7		7			8	
	Máximo	19		17			17	
	No. Datos	9		9			5	
pH (Unidades)	Mínimo	6.3	6.2	6.1	6.1	6.1	6.1	6.4
	Máximo	7.9	8.0	8.0	7.8	7.7	7.2	7.9
	No. Datos	40	40	40	39	40	3	40
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	23.1	22.9	22.6	22.4	22.4	21.0	24.6
	Desviación	2.1	2.0	1.7	1.0	1.0	0.8	1.9
	Mínimo	19.0	19.0	19.0	20.0	21.0	20.0	20.0
	Máximo	28.0	27.0	27.0	24.0	24.0	22.0	29.0
	No. Datos	32	29	27	25	25	3	31

A-5-22

TABLA A.5.10 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGH1-A	FGH1-B	INTFGH1	FGH2-A	FGH2-B	INTFGH2	FGH3-A	FGH3-B	INTFGH3	FLA-A	FLA-B	TANQUE
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	4.3			1.3			0.8			0.7	0.1	0.1	
	Desviación	5.3			1.2			0.8			1.0	0.2	0.3	
	Mínimo	0.2			0.1			0.0			0.0	0.0	0.0	
	Máximo	27			4.9			4.0			5.0	1.0	1.3	
	No. Datos	51			37			38			49	51	51	
TURBIEDAD (UNT)	Promedio	7.2	3.8	3.7		2.8	2.5		2.4	2.2		0.7	0.6	0.8
	Desviación	7.6	3.7	3.3		2.1	2.0		2.2	2.0		0.5	0.4	0.6
	Mínimo	2.1	1.4	1.3		0.9	0.8		0.8	0.7		0.3	0.3	0.3
	Máximo	43	22	18		15	16		14	16		3.6	2.4	3.3
	No. Datos	83	71	71		70	70		79	80		83	83	65
COLOR REAL (UPC)	Promedio	11			8			7			6	3	3	3
	Desviación	13			6			6			6	2	2	2
	Mínimo	2			1			1			1	1	1	1
	Máximo	96			35			32			37	11	8	11
	No. Datos	83			70			72			83	82	83	64
COLIFORMES FECALES (UFC/100ml)	Promedio	947			243			170			47	0.8	0.7	1.7
	Desviación	1830			358			321			71	3.3	2.9	8.5
	Mínimo	10			2			0			0	0	0	0
	Máximo	15100			2240			1820			376	20	25	65
	No. Datos	79			61			67			78	79	80	64
ESTREPTOCOCCOS FECALES (UFC/100ml)	Promedio	954			164			103			69	4.6	4.4	4.4
	Desviación	1717			105			88			130	16.2	20.2	18.9
	Mínimo	74			32			12			2	0	0	0
	Máximo	9400			390			344			640	86	109	100
	No. Datos	28			17			17			28	28	28	27

A-5-23

TABLA A.5.10 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.  
(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTFGH1	INTFGH2	INTFGH3	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	132	116	117	123	117	119
	Desviación	20	17	16	19	15	18
	Mínimo	89	77	85	83	82	71
	Máximo	182	144	142	165	142	159
	No. Datos	21	11	11	21	21	21
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	40	30	26	32	27	31
	Desviación	16	12	12	15	14	12
	Mínimo	9	5	11	7	3	2
	Máximo	63	43	44	59	46	61
	No. Datos	19	11	11	19	19	19
D.D.O. (mg/l O2)	Promedio	< 8.5	< 6.4	< 5.2	< 6.0	< 5.1	< 5.2
	Desviación	5.3	2.0	0.4	2.3	0.4	0.6
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	26.4	10.0	6.4	14.4	6.4	7.2
	No. Datos	22	11	11	22	22	20
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	0.69			< 0.23	< 0.05	< 0.05
	Desviación	0.51			0.27	0.05	0.06
	Mínimo	0.14			0.01	0.01	0.01
	Máximo	2.05			1.20	0.21	0.28
	No. Datos	22			22	22	22
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.14			< 0.05	< 0.02	< 0.02
	Desviación	0.14			0.05	0.02	0.02
	Mínimo	0.01			0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.62			0.20	0.07	0.07
	No. Datos	22			22	21	21

A-5-24

TABLA A.5.10 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración CIDER-Restrepo. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

( Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	INTFGH1	INTFGH2	INTFGH3	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	6.7	6.3	6.5	6.4	10.6	10.1	8.2	
	Desviación	1.1	0.7	0.6	0.4	2.7	1.7	1.9	
	Mínimo	5.4	5.0	5.6	5.5	7.0	7.6	4.5	
	Máximo	12.0	7.7	7.5	7.0	14.4	12.0	11.6	
	No. Datos	30	18	7	27	6	6	24	
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	57			55			56	
	Desviación	5			12			4	
	Mínimo	47			5			49	
	Máximo	65			67			66	
	No. Datos	22			22			17	
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	58			59			55	
	Desviación	14			15			15	
	Mínimo	35			35			31	
	Máximo	77			80			76	
	No. Datos	22			22			17	
pH (Unidades)	Mínimo	7.3	8.0	7.8	7.0	7.8	7.8	7.8	7.8
	Máximo	9.0	8.5	8.1	9.3	8.8	9.4	9.5	9.3
	No. Datos	31	5	3	29	17	17	23	22
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	20.8			22.2	23.0	23.2	21.7	21.9
	Desviación	2.3			0.9	0.7	0.4	1.2	1.8
	Mínimo	15.0			20.0	22.0	23.0	20.0	17.0
	Máximo	24.0			24.0	24.0	24.0	23.0	24.6
	No. Datos	27			13	9	9	5	26

A-5-25

TABLA A.5.11 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Javeriana. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	FGH1-A	FGH1-B	INTFGH1	FGH2-A	FGH2-B	INTFGH2	FGH3-A	FGH3-B	INTFGH3	FLA-A	FLA-B	TANQUE	RED
SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/l)	Promedio	14	5.9			3.6			2.3			1.3	0.1	0.1	0.3	0.1
	Desviación	21	7.9			4.9			3.9			3.3	0.3	0.3	0.5	0.1
	Mínimo	0.2	0.0			0.0			0.0			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Máximo	150	43			24			22			27	1.4	1.5	1.0	0.3
	No. Datos	93	92			44			42			92	91	89	3	5
TURBIDEZ (UNT)	Promedio	18	10	6.3	6.6		4.4	4.6		3.4	3.7		0.8	0.7	0.9	0.8
	Desviación	15	7.8	4.2	4.4		2.7	3.0		2.0	2.7		0.5	0.3	0.3	0.3
	Mínimo	4.9	3.2	2.6	2.7		2.2	2.2		1.8	1.8		0.2	0.3	0.5	0.3
	Máximo	112	55	20	21		17	18		14	21		3.5	2.1	1.5	2.0
	No. Datos	124	121	74	74		72	72		102	102		122	120	23	80
COLOR REAL (UPC)	Promedio	23	20			17			14			13	4	3	2	3
	Desviación	13	10			10			9			8	2	3	1	2
	Mínimo	5	6			6			4			1	1	1	1	1
	Máximo	96	67			54			43			38	10	13	4	11
	No. Datos	124	121			74			72			123	122	120	23	79
COLIFORMES FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	6816	3629			792			446			247	0.7	0.2	0.1	0.0
	Desviación	12422	6518			866			618			334	2.1	0.6	0.4	0.1
	Mínimo	310	210			40			54			26	0	0	0	0
	Máximo	98000	59000			5900			3880			1940	17	3	2	1
	No. Datos	121	119			70			68			121	113	111	22	80
ESTREPTOCOCOS FECALIS (UFC/100ml)	Promedio	3513	1965			518			269			310	0.5	0.2	0.2	0.1
	Desviación	3860	1963			595			220			430	2.2	0.5	0.6	0.2
	Mínimo	300	100			112			46			34	0	0	0	0
	Máximo	18400	9100			2760			952			1900	12	2	2	1
	No. Datos	30	29			19			17			30	29	28	10	19

A-5-26

TABLA A.5.11 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta a escala real Universidad Javeriana. Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.  
(Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDI	INTFGH1	INTFGH2	INTFGH3	FLA-A	FLA-B
SOLIDOS TOTALES (mg/l)	Promedio	67	56	41	41	47	45	42
	Desviación	22	25	26	22	13	13	17
	Mínimo	23	22	14	16	16	6	4
	Máximo	113	127	108	97	79	65	72
	No. Datos	21	19	9	9	19	19	18
SOLIDOS VOLATILES (mg/l)	Promedio	28	24	22	20	18	14	14
	Desviación	14	17	22	17	8	7	10
	Mínimo	7	2	1	2	5	2	1
	Máximo	74	82	77	61	35	21	38
	No. Datos	17	16	8	8	15	15	14
D.O.D. (mg/l O2)	Promedio	< 8.8	< 7.1	< 6.0	< 5.6	< 5.6	< 5.0	< 5.0
	Desviación	4.1	3.4	1.7	1.1	1.6	0.1	0.0
	Mínimo	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Máximo	20.8	18.4	9.2	8.4	12.0	5.2	5.2
	No. Datos	21	20	9	9	18	18	18
HIERRO (mg/l Fe)	Promedio	1.21	0.71			0.28	< 0.10	< 0.10
	Desviación	1.08	0.73			0.28	0.14	0.13
	Mínimo	0.21	0.04			0.04	0.01	0.01
	Máximo	5.60	3.50			1.30	0.54	0.48
	No. Datos	21	20			20	19	18
MANGANESO (mg/l Mn)	Promedio	0.18	0.11			< 0.04	< 0.03	< 0.02
	Desviación	0.09	0.05			0.02	0.02	0.02
	Mínimo	0.02	0.03			0.01	0.01	0.01
	Máximo	0.38	0.18			0.10	0.09	0.06
	No. Datos	21	19			19	18	17

TABLA A.5.11 Estadísticas Descriptivas. Parámetros evaluados. Planta de Demostración Javeriana.  
 Proyecto PRETRATAMIENTOS. Octubre de 1990 a Julio de 1992.

( Continuación.)

PARAMETRO	ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS	CRUDA	FGDi	INTFGH1	INTFGH2	INTFGH3	FLA-A	FLA-B	INTFLA	TANQUE	RED
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	Promedio	6.7	6.4	6.0		5.6	4.2	3.6	3.9		
	Desviación	0.9	0.7	1.1		0.9	1.3	1.1	1.0		
	Mínimo	4.1	5.0	3.0		4.0	2.9	2.7	2.0		
	Máximo	8.8	7.6	7.8		7.6	6.4	5.7	6.0		
	No. Datos	29	27	17		29	6	6	21		
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	16				17			16		
	Desviación	4				3			3		
	Mínimo	11				12			8		
	Máximo	26				24			22		
	No. Datos	21				20			13		
ALCALINIDAD TOTAL (mg/l CaCO3)	Promedio	12				14			16		
	Desviación	3				3			3		
	Mínimo	4				6			10		
	Máximo	19				20			21		
	No. Datos	21				20			13		
pH (Unidades)	Mínimo	6.3	6.3	7.1	7.1	6.4	6.3	6.1	6.7	7.0	3.3
	Máximo	8.1	7.8	7.4	7.4	7.8	7.7	7.8	7.6	7.9	8.0
	No. Datos	72	61	3	2	70	55	53	23	12	54
TEMPERATURA ( °C )	Promedio	22.9	23.0			23.2	23.9	23.9	23.8	22.6	24.1
	Desviación	2.1	1.5			1.3	1.0	0.9	1.4	1.4	1.6
	Mínimo	18.0	20.0			21.0	22.0	22.0	22.0	20.0	18.0
	Máximo	27.0	26.0			26.0	26.0	26.0	26.0	24.0	28.0
	No. Datos	59	33			35	30	30	7	12	39

A-5-28

## **ANEXO 6**

# **SOLIDOS ALMACENADOS EN LECHOS DE ARENA Y GRAVA Y ANALISIS MICROBIOLOGICO EN LECHOS DE ARENA. PERIODO I.**

## **1 OBJETIVOS**

- Determinar la distribución y penetración de lodo dentro de los lechos de grava y arena.
- Determinar la cantidad de lodo almacenado en los lechos de grava.
- Determinar la distribución y penetración de microorganismos en los lechos de arena.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Determinación de los sólidos almacenados en los lechos filtrantes (mg/cm<sup>3</sup>)**

#### **2.1.1 Filtros Gruesos**

Se sacó de operación la unidad a la cual se le iba a realizar el análisis de concentración de lodo. Luego se desocupó lentamente con el objeto de no perturbar la distribución de los sólidos en el lecho, primero superficialmente y después mediante apertura de la válvula de fondo.

Cuando la unidad estuvo libre de agua, se procedió a tomar la muestra de grava con lodo a lo largo del lecho a las profundidades reportadas en las Tablas A.6.1 a A.6.3, en el centro del área superficial. En el Filtro Grueso Horizontal, las muestras fueron tomadas a lo largo de la zona media del lecho filtrante a diferentes profundidades como se presenta en la Tabla A.6.2. La toma de la muestra se hizo con una pala, extrayendo suavemente una muestra del lecho de aproximadamente 1 litro, utilizando envase plástico. Las alturas fueron medidas con respecto al fondo. De acuerdo al tamaño de las piedras presentes en cada muestra, se pesaron de 50 a 100 g de grava en un vaso de 250 ml.

Se añadió y se lavó la muestra con porciones de 50 ml de agua destilada hasta que quedó libre de lodo. El volumen de lavado se llevó a un balón aforado de 500 ml y se enrazó con agua. Con el agua de lavado se realizaron análisis de sólidos suspendidos, volátiles y totales (Standard Methods, 1989). La grava libre de lodo se secó durante una hora a 103°C. Se dejó enfriar 15 minutos. Se llevó a una probeta de 100 ml que contenía 50 ml de agua. Por el desplazamiento de agua se determinó el volumen de grava utilizado en cada uno de los análisis. Los sólidos se expresan como peso de sólidos (mg) por volumen de grava limpia y seca (cm<sup>3</sup>).

### **2.1.2. Filtros Lentos**

Se sacaron de operación los filtros lentos, suspendiendo la entrada de agua, se desocuparon lentamente a través del rebose y después se abrió la válvula de fondo. Para la toma de las muestras se utilizó un barreno que permitía muestrear cada 14 cms. Se tomaron muestras en el nivel superior, en el borde y en el centro de los FLA 2 y FLA4 de la planta piloto en Puerto Mallarino. Para los otros filtros las muestras se tomaron en el centro hasta el fondo del lecho cada 14 cms. De cada uno de estos estratos se tomó muestra para el análisis físico y microbiológico.

Se tomaron de 5 a 10 g de arena. Se lavó con varias porciones de agua hasta dejarla libre de lodo. El agua de lavado se enrazó en un balón aforado de 500 ml. Con este volumen se realizaron los análisis, siguiendo el procedimiento normalizado para sólidos (Standard Methods, 1989). Este proceso se repitió para todas las muestras.

La muestra de arena lavada, se secó a 103 °C durante 1 hora, luego se desecó y pesó.

La densidad de la arena se determinó pesando 10 g de arena limpia y seca. Se midió el volumen por desplazamiento de agua y se calculó la densidad. Con este valor se hizo la conversión de peso a volumen de cada muestra.

Los sólidos se reportan como peso en mg de los sólidos por cm<sup>3</sup> de arena seca.

## **2.2 Análisis Microbiológico de los Lechos de Arena**

### **2.2.1 Recuento estandar en placa**

Se tomaron aproximadamente 10 ml de arena de cada uno de los estratos, medidos por desplazamiento de volumen y se mezclaron con 90 ml de agua de dilución estéril, para obtener una dilución de 10<sup>-1</sup> y se procedió a preparar diluciones hasta de 10<sup>-5</sup>. De cada una de ellas se sembraron muestras por duplicado, utilizando la técnica de recuento en placa. (Standard

Methods, 1989). Se utilizó agar nutritivo y se incubó a 37 °C durante 48 horas. El número de bacterias se reportó como número de microorganismos por cm<sup>3</sup> de arena seca.

## **2.2.2 Análisis Cualitativo del Plancton**

Se hizo por observación microscópica de cada una de las muestras en la dilución 10<sup>-1</sup> (Standard Methods, 1989).

# **3 RESULTADOS**

## **3.1 FILTROS GRUESOS**

En las Tablas A.6.1 a A.6.3 aparecen los resultados de los análisis efectuados a cada una de las muestras de grava donde se presentan los valores de sólidos de la primera unidad de cada línea; los datos de altura de muestreo están referenciados desde el nivel inferior en el lecho de cada unidad. En la Figura A.6.1 se muestran los resultados de sólidos totales en las líneas FGAS y FGDS.

En la Tabla A.6.4 se presenta a manera de ejemplo el cálculo de los pasos para obtener el porcentaje de acumulación de sólidos totales en el filtro grueso ascendente en serie 1 y en la Figura A.6.2 se presentan estos porcentajes para todas las unidades ascendentes y descendentes.

En la Tabla A.6.5 se encuentran los sólidos acumulados por unidad para las alternativas con FGAS, FGDS Y FGH.

**TABLA A.6.1 Resultados de sólidos en el Filtro Grueso Ascendente en Serie 1.**

Fecha : 10-05-90      Tiempo operación: 255 días  
 Tiempo de carrera: 20 días

ALTURA (cm)	SOLIDOS SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOLIDOS VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOLIDOS TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
92	10.73	2.10	12.42
75	102.24	12.60	104.12
54	96.71	11.65	103.29
22	136.50	16.75	138.75
2	170.50	19.63	173.63

**TABLA A.6.2. Resultados de sólidos totales en el Filtro Grueso Horizontal (mg/cm<sup>3</sup>).**

Fecha: Octubre 7 a Octubre 20 de 1990.

COMPARTIM.		1			2		3				
Prof. (m)	Long. (m)	0.03	1.64	3.23	3.41	4.88	5.68	6.14	6.44	6.74	7.35
0.25		111.3	44.0	13.2	7.6	6.8	5.3	6.6	6.2	9.8	4.8
0.80		109.2	28.9	16.2	16.9	59.2	4.5	8.1	7.6	6.0	8.4
1.50		98.2	39.9	73.6	70.1	13.2	7.2	5.5	5.7	10.3	13.6

**TABLA A.6.3**

**Resultados de sólidos en el Filtro Grueso Descendente en Serie 1.**

Fecha : 10-04-90

Tiempo operación: 255 días

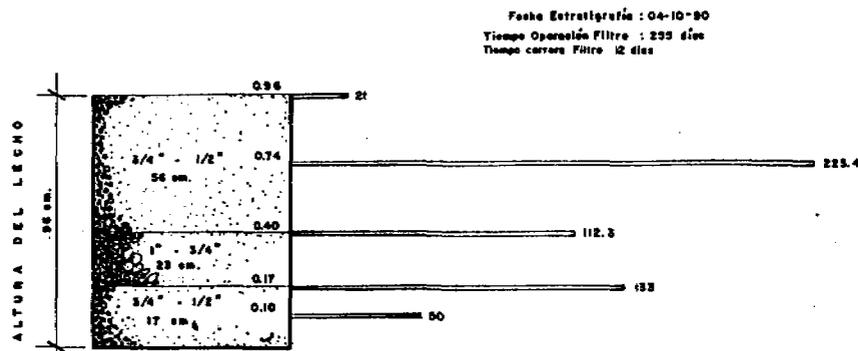
Tiempo de carrera: 12 días

ALTURA (cm)	SOL. SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
96	20.7	3.3	20.9
74	209.8	25.8	225.4
40	109.0	14.0	112.4
17	137.5	16.1	133.3
10	48.9	6.2	49.8

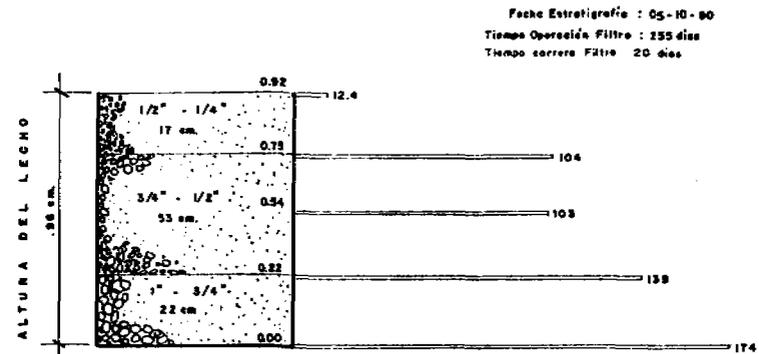
**TABLA A.6.4**

**Acumulación de sólidos totales en el FGAS1**

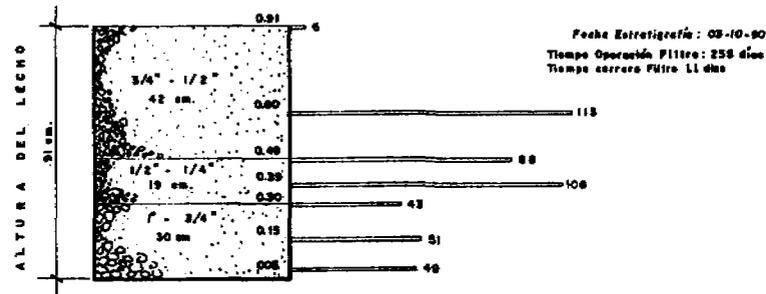
ALTURA DE MUESTREO (m)	VOLUMEN AFERENTE (m <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (g/m <sup>3</sup> de grava)	SOL. TOTALES POR CAPA (g)	SOL. ACUMULADOS (g)	% ACUM ULADO
0.1	0.345	174000	60100	60100	18.0
0.38	0.847	139000	117844	177944	54.9
0.65	0.847	103000	87323	265267	80.0
0.84	0.597	104000	62046	317313	99.0
0.92	0.251	12400	3115	320428	100.0



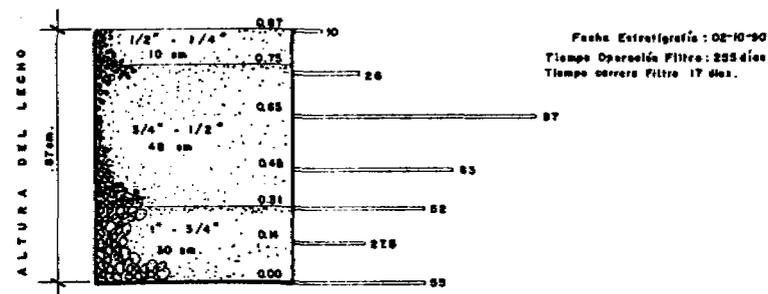
FILTRO GRUESO DESCENDENTE EN SERIE No 1



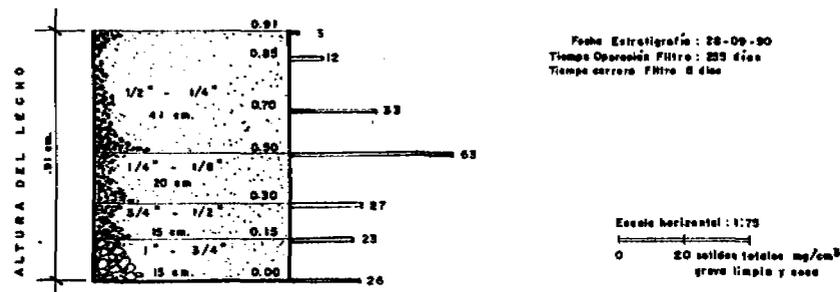
FILTRO GRUESO ASCENDENTE EN SERIE No 1



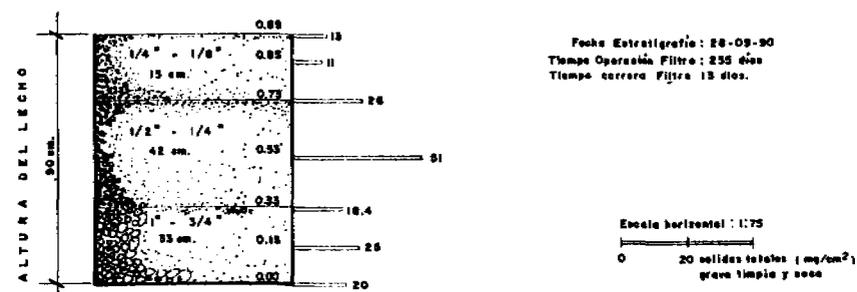
FILTRO GRUESO DESCENDENTE EN SERIE No 2



FILTRO GRUESO ASCENDENTE EN SERIE No 2

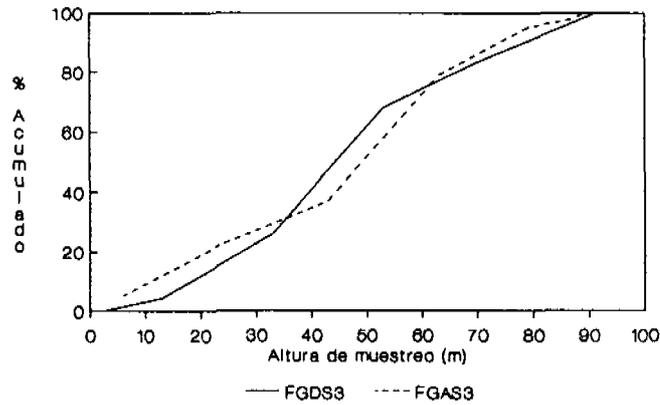
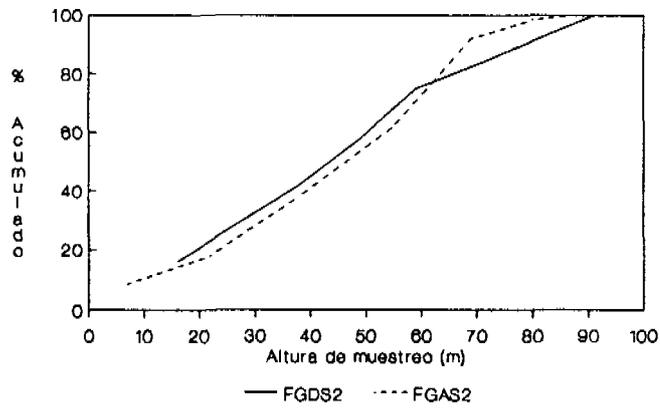
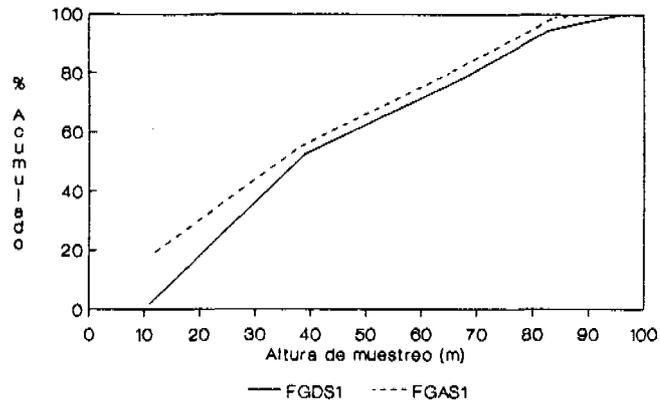


FILTRO GRUESO DESCENDENTE EN SERIE No 3

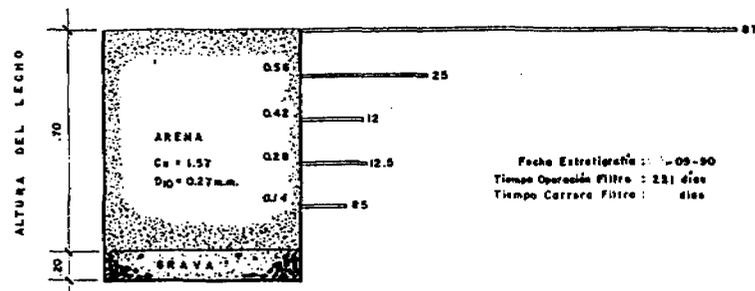


FILTRO GRUESO ASCENDENTE EN SERIE No 3

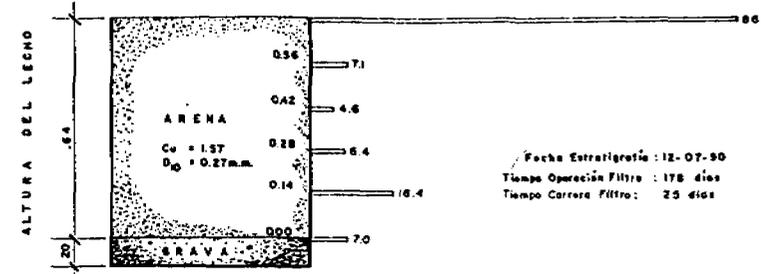
FIGURA A6.1 Determinación de Sólidos Totales (Estratigrafía de Lodos) en Filtros Gruesos Ascendentes y Descendentes Estación de Investigación CINARA - Puerto Mallarino. Proyecto PRETRATAMIENTOS Periodo I.



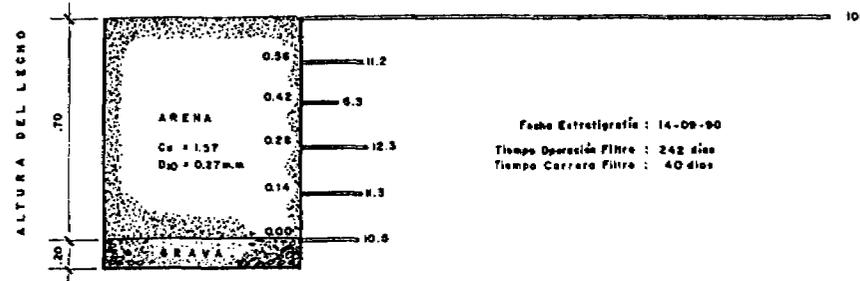
**FIGURA A6.2** Porcentaje Acumulado de Sólidos Totales en los lechos de Grava de Todas las Etapas de Pretratamiento para las Líneas de FGDS y FGAS.



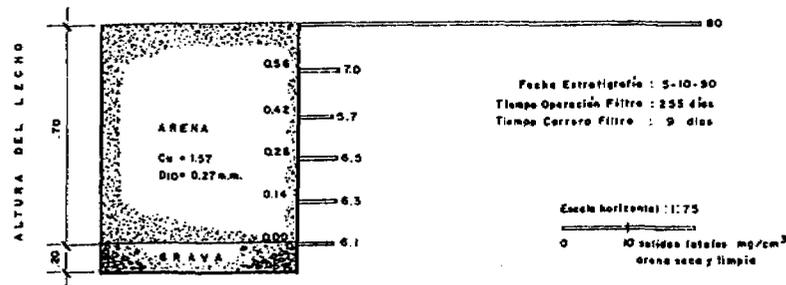
FILTRO LENTO No 1



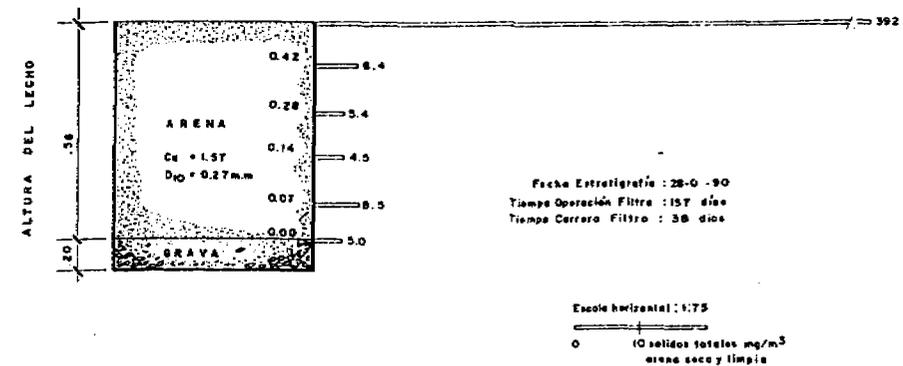
FILTRO LENTO No 2



FILTRO LENTO No 3



FILTRO LENTO No 5



FILTRO LENTO No 4

FIGURA A63 Determinación de Sólidos Totales (Estratigrafía de Lodos) en Filtros Lentos de Arena. Estación de Investigación CINARA - Puerto Mallarino, Proyecto PRETRATAMIENTOS. Período I.

**TABLA A.6.5 Acumulación de sólidos totales en las unidades de pretratamiento (g)**

COMPARTIMIENTO	UNIDAD		
	FGAS	FGH	FGDS
1	28674	593016	328142
2	138819	186445	184821
3	78324	384446	90419

### 3.2 FILTROS LENTOS EN ARENA

En las Tablas A.6.6 a A.6.10 se presentan los resultados de sólidos suspendidos, totales y volátiles, realizados en el lecho filtrante de cada uno de los FLA del sistema de prueba de CINARA, Puerto mallarino y en la Figura A.6.3 se muestran los resultados de sólidos totales para todos los filtros lentos.

En la Tabla A.6.11 se presenta el recuento estándar en placa y en la Tabla A.6.12 el análisis cualitativo del plancton.

**TABLA A.6.6 Resultados de Sólidos en el FLA 1. Puerto Mallarino.  
Línea de Filtración Gruesa Ascendente en Serie.**

Fecha : 03-09-90 Tiempo de Operación : 231 días  
Tiempo de carrera : 30 días

ALTURA (cm)	SOL. SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
70	72.10	12.00	87.30
56	15.34	2.12	25.02
42	6.85	1.32	12.10
28	6.12	1.90	12.47
14	4.80	0.87	8.48
0*			

\* La muestra del fondo no pudo tomarse porque no lo permitió el barreno.

**TABLA A.6.7 Resultados de Sólidos en el FLA 2. Puerto Mallarino.  
Línea de Filtración Gruesa Ascendente en Capas.**

Fecha 12- 07-91. Tiempo de operación : 178 días  
Tiempo de carrera : 25 días.

ALTURA (cm)	SOL. SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
64*	99.67	13.06	99.73
64	88.02	12.18	86.23
56	7.03	0.58	7.06
42	4.30	0.39	4.63
28	4.72	0.54	6.36
14	12.91	1.33	16.35
0	2.70	0.72	7.03

\*Muestra en uno de los bordes.

**TABLA A.6.8 Resultados de Sólidos en el FLA 3- Puerto Mallarino .  
Línea de Filtración Gruesa Horizontal.**

Fecha : 14-09-90 Tiempo de operación: 242 días  
Tiempo de carrera: 40 días

ALTURA (cm)	SOL. SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
70	97.48	17.92	105.92
56	12.37	0.99	11.20
42	6.06	0.45	6.72
28	10.28	0.69	12.30
14	9.03	0.77	11.28
0	8.54	0.62	10.52

**TABLA A.6.9 Resultados de Sólidos en el FLA 4. Puerto Mallarino .  
Línea del sedimentador Horizontal Acelerado con Placas.**

Fecha : 28-06-90 Tiempo de operación : 157 días  
Tiempo de carrera : 38 días

ALTURA (cm)	SOL. SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
56*	294.40	36.13	310.30
56	53.30	43.35	392.39
49	5.57	0.78	8.41
42	2.30	0.63	5.43
28	1.89	0.36	4.45
14	7.45	0.63	8.45
0	4.52	0.33	492.00

\* Muestra tomada en el borde.

**TABLA A.6.10 Resultados de Sólidos en el FLA 5. Puerto Mallarino. Línea de Filtración Gruesa Descendente en Serie.**

Fecha : 05-10-91 Tiempo de operación : 255 días  
 Tiempo de carrera : 9 días.

ALTURA (cm)	SOL. SUSPENDIDOS (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. VOLATILES (mg/cm <sup>3</sup> )	SOL. TOTALES (mg/cm <sup>3</sup> )
70	78.61	13.47	80.00
56	5.58	1.08	6.92
42	5.00	1.56	5.66
28	5.56	1.74	6.53
14	4.13	0.50	6.28
0	5.49		

**TABLA A.6.11 Recuento estándar en placa en los FLA del sistema de unidades de prueba de CINARA - Puerto Mallarino.**

ALTURA (cm)	RECuento EN PLACA (Org/cm <sup>3</sup> de arena)			
	FLA 1	FLA 2	FLA3	FLA 5
70	2050000	210000	2360000	900000
56	665000	13000	38000	70000
42	370000	12000	22000	70000
28	95000	8000	2000	25000
14	20000	8000	8300	14000
0		8000	1700	9000

**TABLA A.6.12 Análisis Cualitativo del Plancton en los FLA del Sistema de Unidades de Prueba de CINARA - Puerto Mallarino.**

ALTURA (cm)	ANALISIS CUALITATIVO DEL PLANCTON				
	FLA 1	FLA 2	FLA3	FLA4	FLA 5
70	AAV-AV- AD-Z	AAV-AV- AD-Z	AAV-AV- AD-Z	AD	AAV-AV- AD-Z
64	AD-Z				
56	AD	AD-Z	AD		AD
42		AD			

AAV : Algas Azul verdosas  
AD : Algas Diatomeas

AV : Algas Verdes  
Z : Zooplancton

#### 4 DISCUSION

En todos los lechos filtrantes el contenido de sólidos totales está expresado como material suspendido de acuerdo a los resultados presentados en las tablas. A continuación se hace una discusión de los resultados en los diferentes lechos.

##### 4.1 Filtros Gruesos

Realizando una comparación entre las Figuras A.6.2 y A.6.3 correspondientes a la acumulación de sólidos a través de los FGAS y FGDS, se observa que la mayor acumulación de sólidos se presenta en la parte inferior del lecho filtrante, los primeros 40 cm presentan una acumulación del orden del 50% en la primera unidad y entre el 30 y 40% en las dos unidades restantes, en este sentido las dos alternativas presentan un comportamiento muy similar, sin embargo, al comparar los porcentajes acumulados de sólidos en la superficie (20 cm finales) estos son del 10% para las unidades con FGAS y del 20% para los FGDS.

La mayor acumulación superficial de sólidos presentada por la alternativa FGDS muestra una ligera desventaja en aspectos de mantenimiento dado que debe realizarse un mayor esfuerzo para la limpieza superficial del filtro. Por otra parte la gran acumulación de sólidos presentada en el fondo, aunque puede ser una ventaja para el lavado de los FGDS, representa un riesgo durante la operación del filtro ya que el lodo se encuentra muy cercano al efluente. Esta podría

ser la causa de traspase de sólidos en comparación con las alternativas FGDS y FGH, aunque las diferencias entre los ascendentes y descendentes son bajas (oscilan entre el 12 y 25%) se puede establecer que el mantenimiento en los ascendentes es más eficiente, ya que las dos alternativas presentan comportamientos similares durante su operación.

En el filtro grueso horizontal la acumulación de sólidos se dió como se esperaba, es decir, una disminución gradual de la concentración de sólidos a medida que el agua fluye de un medio filtrante a otro. (Wegelin, 19 ). Sin embargo en el tercer compartimiento se presenta un reacomodo de las partículas a lo largo del lecho filtrante, posiblemente por la presencia de una capa de arena en este compartimiento.

#### 4.2 Filtros Lentos

El mayor contenido de sólidos se encuentra en la capa superficial de arena.

El porcentaje de sólidos suspendidos es superior al 70% mientras que en el fondo es solo 15%. Este comportamiento esta de acuerdo a lo reportado en la literatura para filtros lentos cuyo flujo es siempre descendente .

En cuanto a los resultados de recuento estandar en placa realizado a los FLA de la planta piloto Tabla A.14.11 el mayor número de bacterias se encontró en la capa superior disminuyendo paulatimente con la profundidad, lo cual resulta lógico, ya que en ésta capa se encuentra la membrana biológica que retiene gran cantidad de bacterias.

La membrana biológica o shmutchdecke del FLA1 de Puerto Mallarino era semejante a una alfombra verde de diferentes tonalidades desde Azulverdosa pasando por amarillo hasta café oscuro, estas tonalidades son manifestación de la diversidad de algas encontradas en este filtro, estando representadas por las Azul - Verdosas (Cyanophyceac) como Oscillatoria y Anabaena, al igual que las Algas Verdes (chlorophyceac) del tipo Desmidium, Coelastrum y Scenedesmus, las Diatomeas (Bacillaryophyceae), que dan coloración café, presentaron cierta diversidad, entre ellas: Gomphonema, Gyrosygma, Nitzchia, Navicula, Asterionella, Cymbella, Diatoma, y Synedra. El zooplancton estuvo representado por ciliados pequeños, flagelados y rotíferos.

La presencia de estos organismos es similar para todos los FLA de la planta piloto, que disminuyen drásticamente con la profundidad hasta desaparecer en las últimas capas. Los organismos encontrados son típicos de estos sistemas de tratamiento como se ha encontrado en otros estudios (Task Committee on Slow Sand Filtration, 1991). Además se consideran algas típicas de aguas con baja velocidad de flujo (Palmer, 1977). Es importante anotar aquí que la formación de la capa biológica fué pobre si se compara con un estudio anterior realizado en

la planta El Retiro (Benitez, 1988), en el cual fué notoria la diversidad biológica. Así mismo es notable que cuando los sólidos se acumulan en grandes cantidades, impiden el desarrollo de la membrana biológica, según lo observado en el análisis del FLA 4, en el que sólo se encontraron unas pocas diatomeas de los géneros Navicula y Nitzchia. Fué este filtro el de mayor contenido de sólidos lo que se explica porque el agua influente no es pretratada, sino únicamente acondicionada. En este filtro no hubo formación de capa biológica como tal, pues fué muy pobre biológicamente, no presentó algas verdes filamentosas que tiene gran importancia en los procesos de colado y adsorción en un filtro lento. (Huisman, 1974).

Los resultados aquí presentados confirman que la membrana biológica está conformada principalmente por organismos autotróficos que necesitan de la luz solar para cumplir con sus funciones vitales (Lloyd, 1974). En general cuando el agua influente a un filtro lento tiene baja turbiedad y bajo contenido de sólidos expresados como sólidos suspendidos, favorece al desarrollo de organismos benéficos para el sistema de filtración lenta en arena y lo contrario sucede si hay presencia de lodo ya que este obstaculiza la entrada de luz y por tanto la formación de la capa biológica.

## 1 INTRODUCCION

La Prueba de Silt es una medida empírica de la fracción (porcentaje en volumen) de Silt (Lodo) y otras partículas que han sido atrapadas en el medio filtrante de los Filtros Lentos con el fin de verificar su estado de limpieza una vez se hace la operación de raspado. La prueba también puede aplicarse a diferentes profundidades en el lecho proporcionando una comparación cuantitativa de la concentración de sólidos que han sido removidos en cada capa del Filtro.

Los resultados se reportan como: % volumen Silt / volumen de arena y se interpretan así: 1-2% para arena lavada, 20% arena con biomembrana que requiere limpieza, 12% arena del fondo que requiere reemplazo total en vez de simple reareneamiento (Lloyd, 1974). Por otro lado Wheeler (1989) reporta que para una eficiente filtración, los filtros lentos de arena no deben tener un contenido de silt mayor del 5%.

## 2 METODOLOGIA

Se analizaron muestras tomadas antes y después del raspado de los filtros lentos de la planta piloto de Puerto Mallarino. El muestreo se hizo en envases plásticos de 250 ml. Se tomaron 50 ml de muestra tomada antes del raspado en una probeta de 250 ml, se agregaron 200 ml de agua destilada, luego se agitó durante varios minutos vigorosamente para lavar la arena y liberarla de lodo. Se dejó sedimentar durante 24 horas, se midió el volumen de lodo depositado. Para la muestra tomada después del raspado del FLA, se tomaron 50 ml en una probeta de 100 ml y se agregó igual volumen de agua. Se agitó vigorosamente. Luego se dejó sedimentar 24 horas y se midió el volumen de lodo depositado.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de Silt test se reportan en porcentaje: volumen de lodo (ml)/ volumen de arena (ml) \* 100. A continuación se reportan los resultados del silt antes y después del raspado de los filtros lentos de la planta de Puerto Mallarino con los días de carrera de cada filtro (ver Tablas 1, 2 Y 3).

Como puede apreciarse, los contenidos más altos de Silt antes y después de la operación de raspado lo presentan el FLA 2 y FLA 3. Estos filtros después de raspados, mostraron con mayor frecuencia contenido de lodo ligeramente por encima del límite de eficiencia reportado por Wheeler para filtros lentos (5%) en los últimos días de carrera donde su altura del lecho es menor respecto a los otros filtros. El aumento de Silt posiblemente se deba a penetración de lodo hacia las capas inferiores de los filtros que va apareciendo a medida que transcurre el tiempo de operación de los mismos (Willians, 1987).

TABLA A.7.1

Resultados de Silt antes y después de raspado del FLA1  
y FLA2 de la planta piloto de Puerto Mallarino  
FLA 1

FECHA	Día de Carrera	SILT TEST	
		Antes de raspado	Después de raspado
07-09-91	28	20	2.0
06-10-91	30	16	2.5
20-11-91	46	40	2.0
23-12-91	34	20	4.0
07-01-92	25	15.6	8.0
13-02-92	29	30	3.7
13-03-92	30	20	4.0
13-04-92	32	60	4.0
09-05-92	27	20	3.0
01-06-92	24	36	6.0
23-06-92	23	30	4.0
23-07-92	30	36	6.0
FLA2			
09-09-92	18	15	2.1
25-11-91	17	18.6	4.8
14-12-91	20	18.9	4.8
07-01-92	25	22	7.7
09-09-92	34	55	5.0
04-03-92	25	80	10.0
09-04-92	37	40	6.0
05-05-92	27	40	4.0
01-06-92	28	32	6.0
23-06-92	23	28	4.0
15-07-92	23	32	6.0

TABLA A.7.2

Resultados de Silt antes y después del raspado de los FLA3  
FLA4 y FLA5 de la planta piloto de Puerto Mallarino

FLA3

FECHA	Día de Carrera	SILT TEST	
		Antes de raspado	Después de raspado
30-09-91	34	40	3.3
28-10-91	29	20	2.0
24-11-91	28	12	4.0
24-12-91	31	31	4.0
26-01-92	34	84	4.0
05-03-92	40	84	4.0
12-04-92	39	72	6.0
07-05-92	26	36	8.0
28-05-92	22	45	6.6
23-06-92	26	24	4.0
15-07-92	23	36	6.0
FLA4			
29-09-92	50	28	5.0
21-11-91	54	40	2.0
29-12-91	39	8.0	5.0
05-02-92	39	48	4.0
11-03-92	36	36	4.0
15-04-92	37	40	4.0
19-05-92	35	36	6.0
17-06-92	30	36	4.0
10-07-92	27	18	4.4
20-07-92	34	38	4.0

**TABLA A.7.3 Resultados de Silt Test antes y después del raspado del FLA5 de la planta piloto de Puerto Mallarino.**

FLA5

FECHA	Dia de Carrera	SILT TEST	
		Antes de raspado	Después de raspado
30-09-91	48	56	1.6
11-11-91	43	26	3.9
17-12-91	37	16	2.0
27-01-92	42	40	4.0
25-02-92	30	85	6.0
23-03-92	28	60	2.0
08-05-92	47	40	4.0
04-05-92	28	14	6.0
10-07-92	38	18	4.4