

LIMPIEZA DE LA BIOMEMBRANA Y SU EFECTO EN FILTRACION LENTA EN ARENA, F.L.A.

LUIS DARIO SANCHEZ

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Magister en
Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Director: Ing. Jorge Latorre M. MSc.

Asesores: Ing. Gerardo Galvis C. MSc.
Profesor, Dr. Huub Gijzen

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE POSTGRADO EN INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI

Abril de 1996

NOTA DE ACEPTACION

La tesis titulada LIMPIEZA DE LA BIOMEMBRANA Y SU EFECTO EN FILTRACION LENTA EN ARENA (F.L.A.), presentada por el Ingeniero Luis Dario Sánchez, en cumplimiento parcial de los registros para optar al título de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, fue aprobada por el jurado el día de de

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	6
1.2.1 Objetivos Específicos	6
2. REVISION DE LITERATURA	7
2.1 CALIDAD DE AGUA AFLUENTE RECOMENDADOS PARA UNIDADES DE F.L.A.	7
2.2 SISTEMAS DE PRETRATAMIENTO EN COMBINACION CON F.L.A.	8
2.2.1 Concepto de Multibarrera	8
2.2.2 Concepto de Tratamiento Integrado	9
2.2.3 Alternativas de Filtración Gruesa que operan con la Tecnología de Filtración Lenta en Arena	9
2.3 FACTORES BIOLÓGICOS QUE INTERVIENEN EN FILTRACION LENTA EN ARENA	10
2.3.1 Crecimiento de poblaciones biológicas	13
2.3.2 Nutrientes	15
2.3.3 Acumulación de Partículas en el Medio Filtrante	17
2.4 MADURACION DE FILTROS LENTOS DE ARENA	18
2.5 LIMPIEZA DEL MEDIO FILTRANTE	21
2.5.1 Raspado del filtro	22
2.5.2 Arado del Filtro (Filter Harrowing)	23
2.6 RIESGO SANITARIO POR DEFICIENCIAS EN LA FILTRACION	25
3. MATERIALES Y METODOS	27
3.1 INTRODUCCION	27
3.2 DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	29

3.2.1	Filtros Piloto	29
3.2.2	Plantas a Escala Real	32
	3.2.2.1 Planta de Tratamiento del Colegio Colombo Británico, Cali ...	32
	3.2.2.2 Planta de Tratamiento de la Parcelación Cañasgordas	32
3.3	PROCEDIMIENTOS	36
3.3.1	Muestreo	37
3.3.2	Procedimiento de limpieza	38
	3.3.2.1 Raspado	38
	3.3.2.2 Arado (FLA 2 Piloto)	39
3.4	DESCRIPCION DE METODOS PARA LOS PARAMETROS EXPERIMENTALES	40
3.4.1	Turbiedad	40
3.4.2	Coliformes Fecales	40
3.4.3	Recuento de Bacterias en Placa	41
3.4.4	Recuento de Algas y Protozoarios	41
3.4.5	Nitratos	42
3.4.6	Fosfatos	43
3.4.7	Medición de Caudal	43
3.4.8	Preparación del Medio Filtrante	43
3.4.9	Prueba de Sedimentación en Columna	44
3.4.10	Determinación de la Densidad del Sedimento Localizado en un F.L.A.	44
4.	RESULTADOS	46
4.1	EFFECTO DE LA LIMPIEZA DEL FILTRO SOBRE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	46
4.1.1	Calidad del Agua Afluente a las Unidades F.L.A.	46
4.1.2	Comportamiento de Coliformes Fecales y Turbiedad	48
4.2	CONDICIONES MICROBIOLÓGICAS DEL MEDIO FILTRANTE SUPERFICIAL DESPUES DE LA LIMPIEZA	54
4.2.1	Algas y Protozoos	54
4.2.2	Bacterias	60

4.3	RELACION ENTRE LA POBLACION MICROBIOLOGICA EN EL MEDIO FILTRANTE Y LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DESPUES DE LA LIMPIEZA	63
4.4	COMPORTAMIENTO DE NITRATOS Y FOSFATOS	65
4.5	CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LOS F.L.A. EVALUADOS	68
5.	DISCUSION	72
5.1	EFECTO DE LA LIMPIEZA DEL FILTRO SOBRE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	72
5.1.1	Calidad del Agua Afluente a los F.L.A.	72
5.1.2	Eficiencia de Tratamiento después de la Limpieza	72
5.2	CONDICIONES MICROBIOLOGICAS DEL MEDIO FILTRANTE SUPERFICIAL DESPUES DE LA LIMPIEZA	75
5.2.1	Algas y Protozoos	75
5.2.2	Bacterias	77
5.3	RELACION EXISTENTE ENTRE LA POBLACION MICROBIOLOGICA EN EL MEDIO FILTRANTE Y LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DESPUES DE LA LIMPIEZA	78
5.4	NUTRIENTES	80
5.5	OPERACION Y MANTENIMIENTO	81
6.	CONCLUSIONES	85
6.1	EFECTO DE LA LIMPIEZA SOBRE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	85
6.2	CONDICIONES MICROBIOLOGICAS DEL MEDIO FILTRANTE SUPERFICIAL DESPUES DE LA LIMPIEZA	85
6.3	RELACION ENTRE LA POBLACION MICROBIOLOGICA EN EL FILTRO Y LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	86
6.4	NUTRIENTES	86
6.5	OPERACION Y MANTENIMIENTO	86
7.	RECOMENDACIONES	87

7.1	CALIDAD DE AGUA AFLUENTE A F.L.A.	87
7.2	OPERACION Y MANTENIMIENTO	87
7.3	FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACION	88
8.	REFERENCIAS	89

"Este trabajo está dedicado a mi Madre, a quién le debo todo lo que soy; a mi padre, mis hermanas (5) y mis hermanos (3) con quienes he compartido mi vida y a mis sobrinos (11) por la Felicidad brindada".

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos al Ingeniero Jorge Latorre M. no solo por su apoyo y confianza al dirigir este trabajo de investigación si no por su magnífica orientación en mi vida profesional.

Al Ingeniero Gerardo Galvis Castaño, Director de CINARA y al Dr. Huub Gijzen, Director del Convenio UNIVALLE-IHE-DUT por sus valiosos aportes y consejos.

Al Ingeniero Ramon Duque, Director Operativo de CINARA quien con su experiencia contribuyó al acotamiento del trabajo.

Al Convenio UNIVALLE-IHE-DUT por su beca para la realización de esta Maestría y a CINARA-IRC por su apoyo financiero para la realización de la fase experimental.

A todos mis compañeros de CINARA de la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología, en especial a: María Mercedes Hincapié, Noel Muñoz, Viviana Magin, Lina María González, Holmes Rosero y Segundo Valverde por su apoyo en la etapa experimental.

A Yezid Solarte por sus valiosos aportes en la metodología y técnicas de evaluación microbiológica.

A Martha Lucía Andrade por su dedicación, sacrificio y voluntad durante la fase de digitación del documento final.

A Luz Angela Bejarano por su grata compañía y apoyo durante la escritura e impresión de este trabajo.

A la administración de las plantas de tratamiento del Colegio Colombo Británico, la Parcelación Cañasgordas y los operarios Jusue (Cañasgordas) y Don José (Colombo Británico) por su apoyo durante la etapa de muestreo.

RESUMEN

Los Filtros Lentos de Arena (F.L.A.) son propuestos como la última fase de tratamiento en la tecnología de filtración por múltiples etapas, FiME y son considerados una barrera que elimina los microorganismos patógenos y algunas sustancias que pueden interferir el proceso de desinfección.

Dentro de las limitaciones más frecuentes que presentan los F.L.A. se han identificado tanto las salidas de operación por limpieza como el requerimiento de período de maduración después de la limpieza, los cuales, según reporta la literatura pueden afectar la calidad del agua efluente.

Esta investigación se orientó al conocimiento de aspectos operacionales y de mantenimiento de sistemas F.L.A. y se llevó a cabo en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología de CINARA-UNIVALLE en Cali - Colombia, donde dos filtros piloto de F.L.A. tratando agua derivada del río Cauca y acondicionada a través de un filtro grueso dinámico y posteriormente pretratada en un filtro grueso ascendente en capas y dos plantas escala real que tratan agua de ríos de montaña fueron evaluadas después de la limpieza de la biomembrana. Los objetivos específicos fueron: 1) Estudiar el efecto de la limpieza sobre la eficiencia de tratamiento y el período de maduración en un F.L.A, cuando se utiliza la técnica de raspado; 2) Explorar la limpieza de un F.L.A por la técnica del "Arado del Filtro" a nivel piloto, en relación a la eficiencia de tratamiento, el período de maduración y como una opción técnica para el mantenimiento de F.L.A y 3) Sugerir recomendaciones para diseño, operación y mantenimiento de F.L.A.

Los mayores hallazgos de esta investigación fueron:

1. La limpieza de un F.L.A causa en general, deterioro en la calidad del agua efluente, disminuyendo la remoción de coliformes fecales entre 0 y 3 unidades logarítmicas. Se evidenció la presencia de períodos de maduración para coliformes fecales entre 0 y 142 horas y para turbiedad entre 17 y 160 horas.
2. Se debe garantizar que después de la limpieza de un F.L.A. el afluente tenga un promedio de coliformes fecales menor a 500 UFC/100 ml y menos de 5 UNT de turbiedad; valores de turbiedad afluente mayores o iguales a 20 UNT no deben ser introducidos al F.L.A.
3. Se identificó que a mayor población de algas y protozoos en el medio filtrante superficial, hay menor población de bacterias y se genera mayor remoción de coliformes fecales. Se registraron los siguientes períodos de recuperación o maduración después

de la limpieza: 1) Algas: entre 44 y 275 horas; 2) Protozoos: entre 68 y 320 horas y 3) Bacterias: entre 48 y 229 horas. Cuando la población de protozoos y bacterias se equilibró alrededor de 6.8 logs/cm^3 de arena se pudo alcanzar una reducción hasta de 4.3 logs de coliformes fecales.

4. Después de la limpieza del filtro las poblaciones de algas y protozoos presentan un patron de crecimiento en forma de "S" que se puede representar a través del modelo logístico mediante la siguiente ecuación: $N(t) = K / (1 + e^{-at})$; donde: K representa la población de organismos antes de la limpieza; a es la posición de la curva con relación al origen; r es el índice de crecimiento de la población por individuo y t representa el tiempo.
5. El período de maduración es función de la calidad del agua afluyente, de la población de organismos remanentes después de la limpieza, la técnica y forma del proceso como se implemente la limpieza.
6. La limpieza por arado presenta una serie de ventajas en comparación al raspado: El filtro queda en mejores condiciones biológicas y presenta menores períodos de maduración.

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 2.1 Crecimiento de Poblaciones	13
Figura 3.1 Unidades Piloto de Experimentación y Puntos de Muestreo	30
Figura 3.2 Filtro Lento en Arena Acondicionado para Limpieza por Arado	31
Figura 3.3 Esquema de la Planta de Tratamiento del Colegio Colombo - Británico, Cali, Colombia	33
Figura 3.4 Esquema de la Planta de Tratamiento de la Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia	34
Figura 3.5 Lectura de Algas y Protozoos en la Placa	42
Figura 4.1 Coliformes Fecales después de Raspado F.L.A. 1 Piloto - Prueba 1	49
Figura 4.2 Turbiedad después del Raspado F.L.A. 1. Piloto - Prueba 1	49
Figura 4.3 Período de Maduración en Función de Coliformes Fecales y Turbiedad	53
Figura 4.4 Reducción de la Eficiencia de Tratamiento en Función de Coliformes Fecales Afluentes y el Período de Maduración después de la Limpieza en F.L.A.	53
Figura 4.5 Comportamiento de las Algas después de Limpieza por Raspado F.L.A. 1 Piloto - Prueba 2.	56
Figura 4.6 Comportamiento de los Protozoarios después de Limpieza por Raspado F.L.A. 1 Piloto - Prueba 2	56
Figura 4.7 Período de Maduración en Función de la Población remanente de Algas y Protozoos después de la Limpieza de F.L.A.	59

Figura 4.8	Correlación entre Algas y Protozoos F.L.A. 1. Limpieza por Raspado, Prueba 2	59
Figura 4.9	Recuento de Bacterias después del Arado FLA 2 Piloto - Prueba 1	60
Figura 4.10	Período de Maduración en Función de la Población remanente de Bacterias, después de la Limpieza de F.L.A.	62
Figura 4.11	Población de Algas - Protozoos y Bacterias antes de la Limpieza en cada F.L.A. Evaluado	64
Figura 4.12	Población de Algas - Protozoos y Bacterias después de la Limpieza en cada F.L.A. Evaluado	64
Figura 4.13	Remoción de Coliformes Fecales en función de la Población de Algas - Protozoos y Bacterias en la Superficie del Lecho Filtrante después de la Limpieza de F.L.A. cuando se alcanza el período de Maduración	65
Figura 4.14	Concentración Media de Fosfatos, Nitratos y Relación N/P en cada F.L.A. Evaluado	66
Figura 4.15	Relación Nitrógeno - Fósforo en función del Índice Finito de Incremento después de la Limpieza en F.L.A.	67
Figura 4.16	Concentración Remanente de Solidos contra Velocidad de Asentamiento en la Superficie del Lecho de un F.L.A.	70

LISTA DE TABLAS

		Pág
Tabla 1.1	Modificaciones en Filtración Lenta en Arena que cambian el Comportamiento del Tratamiento (Collins et al, 1991)	3
Tabla 2.1	Parámetros de Calidad de Agua para Evaluar el Uso de F.L.A. (adaptado de Spencer et al, 1991)	7
Tabla 2.2	Límites Superiores de Calidad de Agua para Uso de la Filtración Lenta en Arena Antecedida por Filtración Gruesa en Gravas (Galvis et al 1994).	10
Tabla 2.3	Población de Bacterias, Algas y Protozoos en la Superficie de un F.L.A Reportado por Diferentes Autores	12
Tabla 2.4	Períodos de Maduración Reportados para Filtración Lenta en Arena.(Logston, 1991)	20
Tabla 3.1	Parámetros y Variables de la Investigación	28
Tabla 3.2	Puntos de Muestreo y Frecuencias para los Parámetros de Evaluación en los Filtros Piloto y Plantas a Escala Real	28
Tabla 3.3	Características de los Filtros Piloto 1 y 2	29
Tabla 3.4	Características de las Plantas a Escala Real	35
Tabla 3.5	Lista de Materiales y Equipos	45
Tabla 4.1	Calidad del Agua Afluyente a Cada Unidad F.L.A. Evaluada	47
Tabla 4.2	Coliformes Fecales y Turbiedad Antes y Despues de la Limpieza de F.L.A.	50
Tabla 4.3	Reducción en la Eficiencia de Tratamiento por Efecto de la Limpieza del Filtro	51

Tabla 4.4	Período de Maduración en F.L.A para Coliformes Fecales y Turbiedad Después de la Limpieza de un F.L.A	52
Tabla 4.5	Condiciones de Algas y Protozoos en la Superficie del Filtro Antes y Después de la Limpieza	54
Tabla 4.6	Período de Maduración e índice de Crecimiento Poblacional para Algas y Protozoos Después de la Limpieza en Sistemas F.L.A	57
Tabla 4.7	Índice Finito de Incremento por Individuo para Algas y Protozoos Después de la Limpieza de Sistemas F.L.A.	58
Tabla 4.8	Población de Bacterias Antes y Después de la Limpieza de un F.L.A. . .	61
Tabla 4.9	Período de Maduración para las Bacterias en F.L.A.	61
Tabla 4.10	Condiciones de Operación y Mantenimiento de los F.L.A. Evaluados por Raspado	69
Tabla 4.11	Condiciones de Operación y Mantenimiento del F.L.A. 2 Piloto Evaluado por Arado	69
Tabla 4.12	Fracción de Tiempo por cada Variable que Afecta la Limpieza y Horas-Hombres Requerida para la Operación	70
Tabla 5.1	Ventajas y Desventajas entre las Técnicas de Limpieza por Arado y Raspado - Evaluación Exploratoria	83

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1 Datos Experimentales
- Anexo 1.1 Comportamiento de Coliformes Fecales y Turbiedad después de la Limpieza en F.L.A. Piloto y Escala Real
- Anexo 1.2 Comportamiento de la Población de Algas y Protozoos después de la Limpieza de un F.L.A.
- Anexo 1.3 Cálculo de los Parámetros a y r en la Modelación de Algas y Protozoos después de la Limpieza de un F.L.A.
- Anexo 1.4 Correlación entre las Poblaciones de Algas y Protozoos en las Diferentes Pruebas
- Anexo 1.5 Comportamiento de las Bacterias después de la Limpieza de un F.L.A.
- Anexo 1.6 Estadísticas Descriptivas para Nitratos y Fosfatos después de la Limpieza de un F.L.A.
- Anexo 1.7 Datos Experimentales para Sólidos Suspendedos: Prueba de Sedimentación en Columna - Agua de Lavado procedente del Raspado Superficial de un F.L.A.

LISTA DE ABREVIACIONES

CINARA:	Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Básico y Conservación del Recurso Hídrico.
IRC:	International Reference Center
F.L.A.:	Filtración Lenta en Arena
A.W.W.A.:	American Water Works Association
FGDi:	Filtración Gruesa Dinámica
FGAC:	Filtración Gruesa Ascendente en Capas
FGAS:	Filtración Gruesa Ascendente en Serie
FGDS:	Filtración Gruesa Descendente en Serie
FGH:	Filtración Gruesa Horizontal
FiME:	Filtración en Múltiples Etapas
USA:	United State of America
UNT:	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
UFC:	Unidades Formadoras de Colonia
IFI:	Indice Finito de Incremento

1. INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

En los últimos años, experiencias en varios países han indicado que para muchas comunidades rurales de los países en desarrollo e incluso desarrollados, la Filtración Lenta en Arena (F.L.A.) bajo circunstancias apropiadas (de desarrollo, económico y tecnológico, ambiental, social y cultural) no es solo la más económica y simple alternativa para el tratamiento, sino que además puede ser un método eficiente por ser considerada una barrera biológica al producir los cambios más significativos en una sola etapa de tratamiento para remoción de microorganismos patógenos causantes de enfermedad (Huisman et al, 1974, Lloyd 1974, Bellamy et al, 1985; Collins et al, 1995).

Uno de los puntos, en favor de esta tecnología es su relativa facilidad de operación y mantenimiento; además de ser económicamente competitiva con otras tecnologías por costos de operación y mantenimiento, lo cual favorece su sostenibilidad (a nivel comunitario). Esta situación la hace atractiva para municipios y zonas rurales donde no existe infraestructura desarrollada y las condiciones socio-económicas no son las más favorables para la aplicación de tecnologías del tipo convencional que requiere el empleo de sustancias químicas y equipos mecanizados (Huisman, 1974; Bellamy, 1985; Galvis et al, 1993). Un manual sobre criterios de diseño, operación, mantenimiento y administración ha sido publicado por CINARA-IRC (1992).

Los sistemas F.L.A. han probado ser efectivos en la remoción de bacterias y virus, como también de sustancias orgánicas e inorgánicas (Bellamy et al, 1985; Hrubec et al, 1991; Hear Holf, 1991). Las características más importantes de los F.L.A. además de las bajas tasas de filtración que emplea son: la ausencia de sustancias químicas en el tratamiento, la limpieza superficial del lecho filtrante por raspado y la extracción de arena (Collins et al, 1995).

Adicionalmente resultados experimentales y de operación han demostrado que una buena eficiencia en el tratamiento se puede obtener con un filtro bien diseñado, bien operado y biológicamente maduro (Bellamy et al, 1985); la "Maduración" se refiere a un estado estable en el filtro en el cual la masa biológica está en balance con los nutrientes disponibles, instante en el cual ocurre una máxima remoción de contaminantes.

A pesar de las múltiples bondades de los sistemas F.L.A., varios aspectos pueden limitar su aplicabilidad cuando es utilizada como única barrera de tratamiento, entre los cuales se pueden destacar los siguientes: 1) limitada aceptación de agua cruda con alto contenido de sólidos y algas; 2) limitada capacidad para remover sustancias orgánicas que al reaccionar con el cloro forma subproductos de la desinfección como los trihalometanos o ácidos haloacéticos y 3) frecuentes salidas de operación por limpieza y presencia de períodos de maduración que pueden afectar la calidad del agua efluente. Tales limitaciones han tratado de superarse y con los avances más recientes se han desarrollado una serie de modificaciones que cambian la operación y el desempeño de esta tecnología. Tales modificaciones se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Modificaciones en Filtración Lenta en Arena que cambian el Comportamiento del Tratamiento (Collins et al, 1991)

Aspecto Limitante	Modificaciones
1. Incremento en la aceptación de agua cruda	<ul style="list-style-type: none"> . Pretratamiento con filtros gruesos en grava . Filtros lentos combinados con mantas sintéticas
2. Mejoramiento en la remoción de precursores subproductos de la desinfección	<ul style="list-style-type: none"> . Preozonación . Modificaciones y combinaciones de medio filtrante (carbón activado, resinas iónicas) . Incremento de la población biológica en el lecho filtrante
3. Minimización de salidas de operación y de períodos de maduración por limpieza de la biomembrana	<ul style="list-style-type: none"> . Filtros lentos, combinados con mantas sintéticas. . Alternativas técnicas de limpieza por rastrillado o arado de la superficie del filtro

Las técnicas de pretratamiento han logrado reducciones importante en turbiedad, coliformes fecales y totales, algas, color, hierro, manganeso y materia orgánica (Collins et al, 1985; Spencer et al, 1991; Cleasby, 1991; Di Bernardo, 1991; Galvis et al, 1993); contribuyendo así a un mejor desempeño de los F.L.A. La utilización de pretratamientos en combinación con F.L.A. se ha extendido con muy buenos resultados en Colombia, en donde su aplicación se ha hecho bajo el concepto de multibarrera y tratamiento integrado dado que la calidad de las fuentes superficiales normalmente presenta limitaciones para alcanzar los criterios de potabilidad y pueden además cambiar entre períodos secos y lluviosos.

El uso de resinas iónicas, carbón activado y preozonación con F.L.A., alcanza excelentes

remociones de precursores orgánicos (Collins et al, 1991), pero presenta desventajas al ocasionar rápidos desarrollos de la pérdida de carga y por la carencia de métodos para la remoción, limpieza y regeneración de los materiales una vez agotados (Collins et al, 1991).

El empleo de mantas sintéticas localizadas en la superficie del medio filtrante aumenta las carreras de filtración y simplifica la técnica de limpieza del filtro, al requerir solamente la remoción del material sintético (Collins et al, 1991; Di bernardo, 1993).

La técnica de limpieza más ampliamente conocida y practicada en los sistemas de F.L.A. es el raspado de los primeros 2 ó 3 centímetros de la superficie del filtro cuando sale de operación al registrarse la máxima pérdida de carga permisible. De acuerdo con Lloyd B, (1974) quizá la consideración operacional más relacionada con la distribución de la microfauna funcional y la flora en el lecho filtrante es la optimización de la limpieza del medio filtrante; argumenta que al secarse el lecho un gran número de bacterias epipsémicas, particularmente formas de esporas que pueden ser resistentes a la cloración aparecen en el efluente cuando un filtro es puesto a trabajar seguido de la limpieza; adicionalmente se remueven bacterias desde su substrato de arena y simultáneamente se diezman las poblaciones de protozoos y micrometazoarios que se alimentan de detritos depositados en los granos de arena.

Collins et al, 1991, ha reportado otro método de limpieza llamado técnica del arado del filtro (Filter Harrowing), (limpieza superficial del lecho con un rastrillo o arado sin extraerlo y aplicando lavado hidráulico) que ha sido desarrollado por los operadores de la planta West Hartford, Conn (USA), el cual se ha evaluado a escala real. Los resultados de la evaluación han indicado que con esta técnica se minimizan las interrupciones del filtro, se acortan los periodos de maduración porque se mantiene una alta población bacteriana en el lecho una vez se ha limpiado, no hay deterioro en la eficiencia del tratamiento y se minimiza el tiempo y trabajo requerido (Collins et al, 1991). Sin embargo en países como Colombia esta técnica de

limpieza no es practicada.

La literatura contiene evidencia de que los procesos limpieza del filtro por raspado o arado (filter harrowing) presentan en períodos de maduración (Cullen y Letterman, 1985, Collins et al 1991) tiempo después de la limpieza para alcanzar la condición estable de una variable de interés en el agua efluente del sistema. Este hecho puede con llevar a un incremento del riesgo sanitario en el agua de consumo por fallas en la operación y mantenimiento del sistema, y que pueden desmejorar la calidad del agua efluente.

La presencia de períodos de maduración después de la limpieza de un F.L.A. es una situación que tiene gran interés en la literatura por ser una desventaja en el tratamiento y por la necesidad de decidir cuando un filtro ha "madurado" lo suficientemente bien para ponerlo en servicio y entregar el agua para consumo.

La literatura también hace referencia a que la limpieza del filtro, la manipulación de la arena y la salida de operación representan costos significativos de operación y que por lo tanto más eficientes técnicos de limpieza deben ser estudiadas (Letterman, 1985; Collins et al, 1991).

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones el presente trabajo de investigación se centra en: 1) el conocimiento de los problemas que puede tener la calidad del agua filtrada en un F.L.A. después de que el medio filtrante es removido por acción de limpieza, y su incidencia sobre el riesgo sanitario; 2) evaluar la influencia de la técnica de limpieza por raspado y arado sobre el período de maduración y la eficiencia de tratamiento y 3) entender la relación entre la eficiencia de tratamiento, limpieza del filtro y período de maduración para sugerir recomendaciones de diseño y operación y mantenimiento de F.L.A.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento de aspectos operacionales y de mantenimiento en sistema de Filtración Lenta en Arena (F.L.A.)

1.2.1 Objetivos Específicos

- . Estudiar el efecto de la limpieza en F.L.A. mediante raspado a nivel piloto y escala real, sobre la eficiencia de tratamiento y el período de maduración.

- . Explorar la limpieza de un F.L.A por la técnica del "arado del filtro" a nivel piloto, en relación a la eficiencia de tratamiento, el período de maduración y como una opción técnica para el mantenimiento de F.L.A.

- . Sugerir recomendaciones para diseño, operación y mantenimiento de sistemas de Filtración Lenta en Arena (F.L.A).

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 CALIDAD DE AGUA AFLUENTE RECOMENDADOS PARA UNIDADES DE F.L.A.

Las recomendaciones de un número de investigadores en relación a la calidad del agua cruda que puede ser soportada por F.L.A se presenta en la Tabla 2.1, los valores consignados indican los límites superiores de los parámetros que pueden ser considerados aplicables a filtración lenta en arena.

Tabla 2.1 Paramétros de Calidad de Agua para Evaluar el Uso de F.L.A. (adaptado de Spencer et al, 1991)

Parámetro	Límite Sugerido	Fuente
Turbiedad	5 - 10 UNT	Cleasby
Algas	200.000 /l	whipple
Color verdadero	15 - 20 UPC	Collins
Trihalometanos	60 µg/l	Collins
Carbono orgánico disuelto no purgable	2.5 mg/l	Glaze
Absorbancia UV, 254 nm	0.08 UA	Edzwald
Oxígeno disuelto	> 6 mg/l	Nysdec
Fósforo (PO ₄)	30 µg/l	Mc Nair
Amonio	3 mg/l	Ellis
Hierro	< 1 mg/l	Cleasby
Coliformes Fecales NMP/100 ml	≤ 500 org/100 ml	Dibernardo

2.2 SISTEMAS DE PRETRATAMIENTO EN COMBINACION CON F.L.A.

Un gran número de modificaciones han sido propuestas para mejorar el comportamiento de esta tecnología dado su gran espacio ganado en el campo de la potabilización de agua y por que su potencial amerita nuevos desarrollos CINARA - IRC (1992).

En los países andinos y tropicales donde las fuentes de agua registran altos niveles de transporte de sólidos y de contaminación, limitan la aplicación directa de F.L.A. y de ahí ha sugerido el desarrollo de alternativas de pretratamiento para acondicionar el agua que procesan las unidades F.L.A, CINARA - IRC (1992)

De acuerdo con Galvis et al (1994), el conocimiento de la naturaleza y de los niveles de la contaminación presente en la fuente permiten identificar el conjunto de soluciones tecnológicas para el tratamiento del agua. En general, cada una de estas soluciones debe satisfacer dos conceptos fundamentales: El de multibarrera o de múltiples etapas y el de tratamiento integrado.

2.2.1 Concepto de Multibarrera

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 interferir en el proceso de desinfección.

2.2.2 Concepto de Tratamiento Integrado

De acuerdo con el concepto de tratamiento Integrado, las posibilidades y limitaciones de cada etapa o barrera para remover los distintos tipos de contaminantes deben ser cuantificados y balanceados, de tal manera que todos los contaminantes puedan ser removidos eficientemente (Lloyd et al 1991).

2.2.3 Alternativas de Filtración Gruesa que operan con la Tecnología de Filtración Lenta en Arena

Teniendo en cuenta los conceptos de multibarrera y tratamiento integrado, CINARA- IRC (1993) ha propuesto y evaluado diferentes sistemas de Prefiltración en grava operando en serie con filtración lenta en arena, dentro de las que se destacan: la filtración gruesa dinámica (FGDi), filtración gruesa ascendente en capas (FGAC), filtración gruesa ascendente en serie (FGAS), filtración gruesa descendente en serie (FGDS) y filtración gruesa horizontal (FGH). Estos sistemas modifican el comportamiento de la filtración lenta en arena y la selección de las barreras que deben instalarse se debe hacer con base en el riesgo sanitario, la eficiencia de remoción y los costos de inversión.

Con base en un estudio realizado por CINARA - IRC (1993) sobre sistemas de pretratamiento la Tabla 2.2 presenta algunos límites superiores de calidad de agua para tratamiento por filtración lenta en arena antecedidas de filtración gruesa en gravas y operando a una velocidad de filtración de 0.15 m/h.

Tabla 2.2 Límites Superiores de Calidad de Agua para Uso de la Filtración Lenta en Arena Antecedida por Filtración Gruesa en Gravas (Galvis et al 1994).

Parámetro	Afluente		Efluente	
	Máximo	Promedio (Menor de)	Máximo	Promedio (Menor de)
Turbiedad (UNT)	25	10	5	2
Color real(UPC)	40	20	15	7
Coliformes Fecales (UFC/100 ml)	1900	550	10	2
Hierro Total (mg/l)	1.0	0.5	0.3	0.2
Manganeso (mg/l)	0.2	0.1	0.1	0.05

2.3 FACTORES BIOLÓGICOS QUE INTERVIENEN EN FILTRACION LENTA EN ARENA

Investigaciones experimentales definitivas aún no se han realizado en filtración lenta en arena con relación a los mecanismos que intervienen en la captura de partículas en el medio filtrante y por eso es común extrapolar los conceptos desarrollados en filtración rápida para F.L.A. Los principales mecanismos que contribuyen a la remoción de contaminantes en F.L.A son descritos por Huisman et al (1974). El mejoramiento de la calidad del agua es 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).

Durante el paso de agua a través del medio filtrante, cada partícula bacteria y virus entra en contacto con la superficie del grano de arena ocasionandose adherencia por atracción de masa

o por fuerzas electrostática.

De esa forma la superficie empieza a ser cubierta con una delgada capa que sostiene una gran cantidad de microorganismos: algas, bacterias, bacteriofagos, rotíferos y protozoos; todos alimentados por las impurezas adsorbidas, las cuales sirven de fuente de energía al tener gran contenido de materia orgánica y nutrientes inorgánicos (nitrógeno, fósforo, etc). El crecimiento biológico se da sobre el lecho de arena y sobre el soporte de grava; además sobre la superficie del lecho se forma una capa de depósitos inertes y material biológico llamado biomembrana (Schmutzdecke).

Tanto la biomembrana como el crecimiento biológico sobre el lecho, tienen un rol importante sobre la efectividad de la filtración lenta en arena. Ambos pueden requerir semanas o meses para desarrollarse. Cuando la biomembrana se ha desarrollado completamente hasta el punto en el cual se colmata la superficie del medio filtrante, causa pérdidas de carga mayores a las establecidas inicialmente, y entonces el filtro deberá ser drenado y la capa superficial tendrá que ser removida (entre 1 y 2 cms).

Estudios previos en filtración lenta en arena han presentado que la población bacteriana declina con la profundidad en el filtro, sugiriendo esta situación que gran parte de la cantidad de biomasa en el filtro está asociada con la biomembrana (Duncan 1988, Mallevalle and Duguet 1988; Seelaus et al 1986; Schmit and Hippold 1989). La Tabla 2.3 resume la población de organismos en la superficie del filtro reportada por los distintos investigadores.

En un estudio sobre la actividad microbiológica en filtros lentos de arena desarrollado por Eighmy et al (1993), ha concluido que: a) altos niveles de biomasa bacteriana esta localizada en la biomembrana; por lo tanto mucho del potencial metabólico existe en esa biopelícula; b) algunas interacciones especie-especie probablemente están ocurriendo y c) la población nativa

(autóctona) probablemente pueden sacar de competencia bacterias entéricas por su capacidad para utilizar bajas concentraciones de materia orgánica natural.

Tabla 2.3 Población de Bacterias, Algas y Protozoos en la Superficie de un F.L.A Reportado por Diferentes Autores

Tipo de Organismo	# de Organismos en la Superficie del Lecho	Autor	Comentario
Bacterias	10^6 /gr de arena	Hazen (1913)	
	$4 \cdot 10^9$ /cm ³ arena	Galal	Evaluación en filtros descubiertos
	$7 \cdot 10^7$ /cm ³ arena	Seelus et al (1986)	Primeros 5 centímetros de arena
	$2 \cdot 10^6$ UFC/cm ³ arena	Mallevalle y Duguet (1988)	
	$1 \cdot 10^9$ /gramo de arena seca	Collins (1989)	
	$1 \cdot 10^7$ /gramo de arena seca	Schmidt (1963)	
	10^3 /ml	Lloyd (1974)	Agua de la superficie del lecho. Bacterias saprofitas cultivadas en agua de levadura peptona a 37° C en 24 horas.
Protozoos	1500/cm ² arena	Lloyd (1974)	Población típica de protozoos en una columna de filtro de arena maduro
	(409 - 14049)/gramo de arena	Dibernardo (1993)	Conteo de ciliados, flagelados ripozodos y nematodos en los primeros 5 centímetros de arena.
Algas	2400/gramo de arena	Dibernardo (1993)	Conteo de Bacillariophyta en los primeros 5 centímetros de arena.

Bishop et al. (1995) ha estudiado la estructura de una biomembrana, su distribución microbial, y el transporte de masa sobre los procesos de biodegradación. Con base en sus resultados se ha podido establecer que la densidad de los organismos cambia con la profundidad de la

biopelícula y es el resultado de la competición entre las bacterias en el interior de la biopelícula por substrato y espacio.

El conocimiento del crecimiento de las poblaciones biológicas, las estrategias nutricionales, la acumulación de partículas, composición de especies y la estructura de las comunidades biológicas en la biomembrana son importantes para valorar el metabolismo, la biodegradación y el crecimiento potencial de las bacterias en filtración lenta en arena.

2.3.1 Crecimiento de poblaciones biológicas

De acuerdo con Krebs (1985) una población de organismos que esta presente en un medio ambiente favorable aumentará su número. No obstante las poblaciones no incrementan geoméricamente de manera continua. La densidad aumenta poco cuando una población vive y crece en un espacio limitado. La curva de crecimiento con que se representa a una población de este tipo es sigmoide, o en forma de "S" (figura 2.1). Esta curva se caracteriza por dos aspectos: 1) Tiene asintota superior (es decir, la curva no excede a un nivel máximo dado). 2) Se acerca a esta asintota en forma gradual y no súbita.

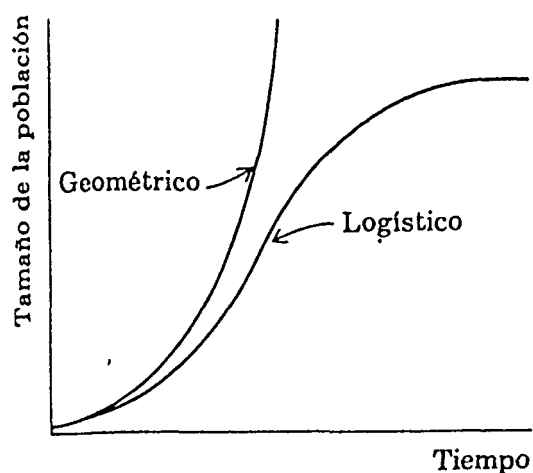


figura 2.1 Crecimiento de poblaciones. El crecimiento geométrico corresponde a un medio ambiente ilimitado, y el logístico, a uno limitado.

La forma de representar una curva sigmoide es la ecuación siguiente:

$$\frac{dN}{dt} = r * N * \frac{(k-N)}{k} \quad (2.1)$$

Donde:

N = Tamaño de la población.

t = Tiempo

r = Índice de crecimiento de la población por individuo.

k = Asintota superior o valor máximo de N.

Esta es la forma diferencial de la ecuación para la curva logística que planteo originalmente Verhulst en 1838 para describir el crecimiento de las poblaciones humanas. También se puede expresar como:

$$N(t) = \frac{k}{1 + e^{-a-rt}} \quad (2.2)$$

Donde:

N(t) = Tamaño de la población en el tiempo t.

e = Base de los logaritmos naturales

a = Constante de integración que define la posición de la curva con relación a su origen.

r, k, t según definición anterior.

En términos biológicos r es el índice de crecimiento de la población por individuo o también conocido como capacidad inhata de incremento. Krebs (1985), define a este término como el índice máximo de incremento logrado con cualquier combinación específica de temperatura, humedad, calidad de alimentos; cuando la cantidad de alimentos, espacio y otros organismos de la misma especie permanecen en un nivel óptimo. Los factores ambientales que afectan a

r son: La cantidad de nutrientes, el espacio para crecer y la densidad de la población.

La capacidad inhata de incremento o índice de crecimiento de la población por individuo es un índice instantáneo al que se puede transformar en uno finito mediante la fórmula reportada por Krebs (1985):

Índice finito de incremento por individuo (IFI) = $\lambda = e^r$ (2.3)

En estos términos el índice finito de incremento indica cuantos organismos futuros existirán por cada individuo en el presente.

2.3.2 Nutrientes

De acuerdo con Lloyd (1974), en ecosistemas como F.L.A los organismos fotosintéticos (productores primarios), se benefician de los nutrientes transportados por el agua afluyente en forma de Nitratos y Fosfatos, estos nutrientes contribuyen al desarrollo de las algas que a su vez son fuente de alimento de los protozoos. Los detritus transportados por el agua afluyente y generados por la muerte y descomposición de los productores primarios (algas), son utilizados por las bacterias (especialmente bacterias saprofitas) para su crecimiento, las bacterias a su vez son fuente de alimento de los protozoos y rotíferos, principales consumidores primarios de la cadena alimenticia en F.L.A (Lloyd 1974).

Los microorganismos en la biomembrana necesitan de fuentes de carbono, nitrógeno, fósforo y azufre para su crecimiento (Spencer et al 1991), por cada miligramo de carbono removido por la biomembrana, 0.04 mg de nitrógeno y 6 ug de fósforo son requeridos (Mc Carty, 1970). Mc Nair et al (1987), encontró que de 3 a 13 mg/l de fósforo en la forma de ortofosfatos y aproximadamente 0.10 mg/l de Nitratos fueron removidos por filtración lenta en arena.

En aguas naturales y aguas residuales las formas de nitrógeno de gran interés son en orden decreciente del estado de oxidación: Nitratos, Nitritos, Amonio y Nitrógeno Orgánico. Todas estas formas de nitrógeno, como también el nitrógeno gaseoso (N_2), son bioquímicamente interconvertibles y son componentes del ciclo del nitrógeno.

El nitrato generalmente está presente en trazas muy pequeñas en aguas naturales, este es un nutriente esencial para muchos autotrofos fotosintéticos y en algunos casos ha sido identificado como un nutriente limitante del crecimiento.

El fósforo está presente en aguas naturales y aguas residuales en la forma de fosfatos. Estos están clasificados como ortofosfatos, fosfatos condensados (Piro - meta y otros polifosfatos) y fosfatos orgánicos. Ellos están presentes en solución, en partículas, detritus o en los cuerpos de los organismos acuáticos. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser el nutriente que limita la producción primaria de los cuerpos de agua.

De acuerdo con Riegman (1995) el término "limitante" se refiere al impacto de la concentración de nutrientes sobre la tasa de crecimiento de las especies de algas. La producción primaria en una cadena alimenticia es usualmente "controlada" por una combinación de factores como: nutrientes de entrada, crecimiento de algas y la regeneración de nutrientes por el zooplancton. los factores de control no son posibles de identificar sobre la base de las concentraciones independientes de los nutrientes, sino a través de su relación N/P, la cual puede dar una indicación de los factores de control (Riegman, 1995).

En un experimento de competición Riegman et al (1992, 1993), ha presentado que el *phaeocystis* (protozoo flagelado), ha tenido mayor dominancia sobre otros flagelados a una relación N/P de 1.5 y su número decreció en la medida que la relación N/P aumentó. Indicando su pobre competencia por los fosfatos pero una buena competencia por el nitrógeno.

2.3.3 Acumulación de Partículas en el Medio Filtrante

En filtración lenta en arena, las partículas se remueven de manera efectiva sin el uso de coagulantes químicos. De acuerdo con una revisión realizada por Ellis (1985) algunos autores han sugerido que la actividad biológica dentro de la parte superficial del medio filtrante es un factor importante en la adherencia de partículas. La hipótesis planteada es que los polisacáridos exocelulares aumentan la eficiencia de adherencia. Además es posible que las moléculas poliméricas se extiendan desde la superficie biológica dentro del medio y adhieren las partículas. Ellis (1985) y LLOYD (1974) afirman que la remoción de bacterias probablemente se debe primero que todo a la acción de los predadores, especialmente protozoos y rotíferos.

De acuerdo con Rittman y Mc Carty (1980), las características que tienen las bacterias para su acumulación neta es controlada por cuatro procesos: crecimiento, deposición, decaimiento y separación. El crecimiento es proporcional a la tasa de utilización de sustrato, el cual depende de la cantidad de biomasa adherida, el transporte de masa y cinética de utilización de sustrato. La deposición de bacterias suspendidas, las cuales además incrementan la acumulación de biomasa adherida, esta controlada por la concentración de bacterias suspendidas y parámetros físico-químicos que afectan el transporte y adherencia sobre la superficie. La biomasa decae primero que todo por el suministro de energía para el mantenimiento, reduce la biomasa adherida y ocurre en proporción a la biomasa activa. El desprendimiento puede ser el mayor mecanismo de pérdida de la biomasa adherida y la mayor fuente de biomasa suspendida, la tasa de desprendimiento es proporcional a la cantidad de biomasa adherida y a las fuerzas hidrodinámicas.

2.4 MADURACION DE FILTROS LENTOS DE ARENA

Bellamy et al (1985), a establecido que las condiciones microbiológicas que gobiernan la efectividad de un filtro lento en arena son: 1) El grado de formación de la biomembrana y 2) La maduración microbiológica del lecho de arena. Estas dos condiciones han demostrado afectar la remoción de contaminantes presentes en el agua de entrada.

Con base en estas condiciones, Bellamy et al (1985) ha definido cuatro modos de operación de los filtros lentos: 1) Filtros nuevos, que recién han empezado a operar; 2) Filtros a los que se les ha reemplazado la arena; 3) Filtros a los que se les ha removido la biomenbrana y 4) Filtros en operación estable ó maduros. Estos modos de operación han comprobado tener un efecto sobre la comunidad biológica. En consecuencia su eficiencia de tratamiento dependerá de la condición como opere y se mantenga el filtro.

La comunidad biológica en el filtro está definida en estado de "crecimiento" o "maduración". El crecimiento está referido a una condición de estado no estable donde la cantidad de masa biológica es menor que el nivel que puede ser soportado por la carga de nutrientes presentes. Consecuentemente, la comunidad biológica está creciendo e incrementando en masa. Esta condición corresponde al de un lecho filtrante nuevo o filtro que recién entra en operación. Una comunidad biológica en estado "maduro" se considera en estado estable y la masa biológica está en balance con los nutrientes disponibles. En este estado ocurre una máxima remoción de contaminantes en el filtro (Bellamy et al, 1985).

Cuando una biopelícula se desarrolla a su máxima capacidad para una condición dada, se dice entonces que el filtro esta maduro. El máximo punto hasta el cual se desarrolla la biopelícula aun no ha sido definido. Sin embargo, investigaciones adelantadas por Bellamy et al (1985), Barret (1987) y Bryck (1987) en experimentos con filtros piloto, han presentado que el máximo

punto hasta el cual la biopelícula se desarrolla es mucho menor para aguas con limitado contenido de nutrientes que para agua rica en nutrientes, pero estos niveles de nutrientes no se encuentran claramente definidos en la literatura.

Filtros lentos de arena con niveles de nutrientes limitados pueden tener una remoción de 2 unidades logarítmicas en coliformes después de que el filtro este maduro (Bellamy et al 1985). Filtros con agua rica en nutrientes pueden tener una eficiencia de remoción de 3 unidades logarítmicas (Bellamy et al 1985) y algunas veces sostienen remociones de 4 unidades log, (Barrett 1989).

Otros autores sostienen que la construcción o crecimiento de la biomenbrana, particularmente en filtración lenta en arena ,es conocida como "la maduración del filtro". Esto puede requerir algún tiempo después de que el filtro ha sido puesto en servicio, antes que la eficiencia de remoción deseada de bacterias sea alcanzada. Las características del agua cruda, la tasa de filtración y otros factores como la edad del filtro, la fuerza de presión para el paso del agua a través de la biomembrana y el tipo de arena, determinan esta condición.

En la literatura sobre filtración lenta en arena, la remoción de partículas es atribuida a la biomembrana. Pero investigaciones adelantadas por Bellamy et al (1985) indican que cuando se tiene un lecho maduro con biomembrana desarrollado la remoción de coliformes totales es de 3 unidades logarítmicas. Cuando la biomembrana es removida el porcentaje de remoción se disminuye a 2 unidades logarítmicas. De igual manera el reemplazo de arena (rearenamiento) reduce casi en una unidad logarítmica la eficiencia del tratamiento. Indicando esta situación que la maduración del lecho de arena es responsable de la mayor remoción que se pueda presentar en la unidad.

De acuerdo con Collins et al (1993) la maduración del filtro se refiere a la edad del desarrollo

microbiológico de la biomembrana y del medio filtrante y generalmente se cuantifica por reducciones en el agua efluente de la turbiedad y el contenido bacterial. Otros indicadores de maduración propuestos por Collins et al (1993) incluye también, reducción en color, oxígeno disuelto y pH (para agua de baja alcalinidad) en el efluente del filtro cuando es comparado con el afluente.

Varios estudios han reportado que tales períodos de maduración evidentemente existen. En la Tabla 2.4 se resumen algunos de los períodos de maduración reportados para filtros nuevos que recién entran en operación.

Tabla 2.4 Períodos de Maduración Reportados para Filtración Lenta en Arena.(Logston, 1991)

Estudio	Período de Maduración	Comentario
Poynter y slade (1977)	60 días	Cuando la remoción en virus fue normal
Sundaresan y paramasivanm (1982)	35 días	Cuando E. coli estuvo ausente en el filtrado
Bowles et al (1983)	60 días	Cuando la turbiedad en el filtrado fuera menor que la turbiedad afluente
Fox et al (1984)	40 días	Cuando el conteo de coliformes totales fuera generalmente menor a 1/100 ml
Bellamy et al (1985)	35 - 50 días	Cuando los coliformes totales en el filtrado se han estabilizado
Ballamy et al (1985)	280 días	Cuando la remoción de giardias fuera entre el 99% al 100%
Pyper (1985)	100 días	Cuando desaparecen los resultados de bajas remociones

Letterman y Cullen (1985) evaluando períodos de maduración en plantas a escala real una vez finalizada la limpieza, reporta períodos de maduración que varían entre 6 horas y 12 semanas. La puesta en marcha de un filtro que ha sido raspado requiere monitoreo cuidadoso por parte

del operador porque el filtro puede manifestar un "período de maduración". Desafortunadamente, no es claro el entendimiento sobre porque o como exactamente ocurren los períodos de maduración, una de las hipótesis más aceptadas es de que una biomembrana completamente desarrollada se requiere antes de que una máxima eficiencia de filtración sea alcanzada y que durante el período de maduración la biomembrana esta en formación.

Como se ha anotado previamente, algunas creencias es de que este período de maduración corresponde a la re-estabilización de una comunidad biológica dentro del lecho del filtro. Sin embargo, otras creencias es que este período de maduración corresponde a una readherencia o flujo de material que ha sido mecánicamente aflojado o desorbido desde el medio filtrante durante una operación normal de limpieza.

2.5 LIMPIEZA DEL MEDIO FILTRANTE

Una desventaja significativa de la filtración lenta en arena la representa el tiempo que deja de operar el filtro durante la operación de limpieza por raspado y la necesidad de decidir cuando un filtro ha madurado lo suficientemente bien para ser puesto en operación. La literatura reporta que la limpieza del filtro, la manipulación de la arena y las salidas de operación del filtro pueden representar una porción significativa de los costos de operación y que por lo tanto más eficientes técnicas de limpieza deben ser desarrolladas antes de que los filtros lentos puedan ser más atractivos para muchas comunidades pequeñas.

Alternativas para la limpieza de los filtros lentos incluyen la utilización de las mantas sintéticas y el empleo de la técnica del arado del filtro (filter harrowing). Las mantas sintéticas pueden ser usadas para acortar el tiempo requerido por limpieza, y disminuir los costos de inversión. La operación y mantenimiento depende del tamaño de la manta; pero, un método manual de

limpieza para grandes áreas de filtro aun no ha sido establecido (Collins et al 1991).

2.5.1 Raspado del filtro

El lecho de arena no estratificado utilizado en filtración lenta en arena se limpia por un procedimiento llamado "raspado". En filtros lentos de arena las carreras del filtro progresan en la medida, que partículas de diversas formas y tamaños son depositadas por acciones de mecanismos físicos como el cernido y la sedimentación, al igual que por actividad biológica en la parte superficial y dentro del lecho filtrante. Estos procesos incrementan la pérdida de carga a través del medio filtrante y eventualmente el material deberá ser removido para mantener la tasa de diseño de flujo constante. La remoción de una delgada capa de depósitos en el medio filtrante es lo que se conoce como proceso de raspado.

La frecuencia de raspados depende de variables como: perdida de carga disponible, Tamaño y distribución del medio filtrante, calidad del agua afluente a la unidad y temperatura del agua. Cuando las algas crecen en el agua sobrenadante del medio filtrante, estas pueden ser una fuente de solidos que acortan las carreras de filtración.

Evaluaciones de filtros a escala real en Estados Unidos (Slezak 1983; Slezak y Sim 1984; Cullen y Letterman 1985) ha indicado que la frecuencia de raspados esta en el rango de una semana a un año con una frecuencia promedio de alrededor de 1.5 meses. Desde el punto de vista económico y operacional carreras de filtración de 30 días pueden ser consideradas satisfactorias para filtros lentos en arena que utilizan métodos convencionales de remoción de la biomembrana (Collins et al. 1991), pero la literatura no da una explicación clara al por qué este valor.

La limpieza del lecho puede ser llevada a cabo manualmente o con equipo mecanizado. La

limpieza manual es una práctica común en los países en desarrollo y es realizada por operadores usando palas de extremo plano y valdes. Se remueve la biomembrana y la superficie de arena adherida a él. Cuando el filtro ha sido raspado, la parte superficial de la arena es nivelada con un cuarton de madera o una pieza metálica antes de que inicie nuevamente la operación. Después del raspado, el filtro usualmente se llena con agua por el fondo para eliminar burbujas de aire que hallan penetrado al lecho filtrante. La literatura recomienda que el filtro no debe secarse completamente y debe rasparse rápidamente para minimizar disturbios en la población bacterial y acortar los períodos de maduración. (Huisman 1974, LLoyd 1974). A este respecto LLoyd 1974 recomienda que el nivel de agua en el filtro debe descender máximo 10 cm por debajo de la superficie del lecho; pero en cuanto al tiempo que debe durar la limpieza del filtro no se reportan recomendaciones.

La técnica de raspado es considerada como una labor muy intensa que requiere de períodos de maduración después de cada limpieza. De acuerdo con Collins et al (1991), el raspado de un filtro requiere aproximadamente de cinco horas-hombre de trabajo por 93 m² de superficie del filtro (0.053 h-H/m²), mientras que la condición de rearenamiento requiere de 50 horas-hombre de trabajo para la misma área de filtro (0.54 h-H/m²). Letterman y Cullen (1985) reportan un requerimiento de tiempo de aproximadamente 4 horas-hombre de trabajo para el raspado de 108 m², (0.037 h-H/m²) mientras que 50 horas-hombre para el rearenamiento de 108 m² fueron requeridas, (0.46 h-H/m²), el procedimiento detallado del raspado, rearenamiento, el lavado y almacenamiento de arena es descrito por Ellis (1985) y Huisman and Wood (1974).

2.5.2 Arado del Filtro (Filter Harrowing)

Collins et al (1991) ha reportado un método de limpieza llamado técnica de rastrillado del filtro (filter harrowing), el cual ha sido desarrollado por los operadores de la planta de West Hartford, Conn (USA).

Las principales características de la versión de los filtros de la West Hartford, incluye un vertedero ajustable a lo largo del filtro, un sistema de lavado con flujo horizontal instalado a lo largo del filtro y al lado opuesto del vertedero de descarga y un sistema de retrolavado por el fondo del medio filtrante.

Cuando la pérdida de carga se aproxima a su valor máximo, el agua sobrenadante es drenada hasta una altura aproximada de 30 cm arriba del medio filtrante. Un tractor equipado con un arado se localiza encima de la arena para rastrillarla. Simultáneamente, un chorro de agua sobre la superficie del filtro es abierto, causando la descarga del agua sobrenadante. Como el arado es arrastrado sobre la arena, desechos coloidales en los 30 cm encima de la arena son arrastrados y atrapados por los chorros de agua en movimiento y son eventualmente descargados en la superficie del filtro, pero no alcanzan a penetrar en el medio filtrante. Cuando la acción de rastrillado ha finalizado el agua sobrenadante del filtro se baja por debajo del medio filtrante y la operación es suspendida hasta que el filtro se llene por el fondo hasta una altura de 30 cm por encima del medio filtrante, tiempo en el cual el arado es reanudado. El proceso es repetido hasta que toda el área superficial halla sido arada. Las carreras de filtración generalmente tardan entre 4 y 8 semanas antes de que el arado sea requerido mientras que el lecho es removido completamente cada 8 o 10 años (Collins et al 1991).

El método aparentemente causa una mayor deposición de los desechos coloidales en la superficie del lecho, mientras que la población bacteriana es barrida hacia la profundidad del lecho de arena. La capacidad para mantener una alta población bacteriana después del arado del filtro permite poner rápidamente en línea la unidad sin deteriorar el comportamiento del tratamiento (Collins et al 1991).

2.6 RIESGO SANITARIO POR DEFICIENCIAS EN LA FILTRACION

La presencia de un sistema de tratamiento no necesariamente indica ausencia de riesgos para la salud, sistemas con adecuado tratamiento instalado pueden aun ser fuente significativa de enfermedades de origen hídrico por las deficiencias en la operación y mantenimiento (Regly et al 1994).

Como la limpieza del filtro lento origina un período de maduración, entonces una de las mas importantes decisiones que debe tomar un operador es cuando poner en funcionamiento un filtro lento de arena después de la operación de limpieza, además el operador deberá tener serios cuidados en la operación y mantenimiento del sistema antes y después de la operación de limpieza de la membrana biológica y el reemplazo de arena, por que, al presentarse disminución en la eficiencia de tratamiento se aumenta el riesgo sanitario sobre la población usuaria del sistema. Pese a que esta condición no es una falla en el sistema, hay que minimizar su incidencia o tomar medidas preventivas para no ocasionar enfermedades de origen hídrico que serían favorecidas más significativamente si solo una barrera de tratamiento está disponible y no existe la desinfección como barrera de seguridad en el sistema.

Un caso extremo de inapropiada operación de un FLA (reportado por A.W.W.A 1993) ha ocurrido en Keene, New Hampshire, durante una epidemia de tifoidea, la cual ocurrió en el año de 1959. La epidemia fue hallada en la cuenca, coincidiendo con una fuerte precipitación que la arrastró hasta el sitio de planta de tratamiento, en la cual un filtro lento recientemente había sido sometido a limpieza y puesto en funcionamiento sin un adecuado período de maduración.

Recientes estudios (Crawn, 1994; Regly 1994) indican que incluso si el sistema de filtración opera efectivamente (2 log de remoción de virus y protozoo), cientos de miles de veces más enfermedad y mortalidad por enfermedades virales podrían resultar si la desinfección residual

en el sistema de distribución estuviera ausente durante cortos intervalos de tiempo.

Cuando un sistema de tratamiento se considera que no presenta alguna falla, la filtración y la desinfección con cloro alcanza una reducción de 3 log. en giardia y 6 log. en la reducción de virus, antes del primer consumidor. La reducción de 3 log. en giardia, implica reducción de 2.5 log. por filtración y 0.5 log por desinfección. La reducción de 6 log en virus considera que 2 log de reducción se logran por filtración y una inactivación de 4 log es por desinfección (Regly et, al 1994).

La posibilidad de una total falla del tratamiento es mucho más probable si solo una barrera de tratamiento está instalada. Sin embargo, si aún la filtración y la desinfección están instaladas, una falla en el proceso de filtración puede comprometer la eficiencia de la desinfección al grado de poderse presentar una falla total en el tratamiento.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 INTRODUCCION

La investigación se llevó a cabo en la estación de investigación y transferencia de tecnología de CINARA ubicada en Puerto Mallarino - Cali - a orillas del río Cauca. Dos unidades piloto de F.L.A. antecedidas de filtración gruesa ascendente en capas (FGAC) y filtración gruesa dinámica (FGDi); se evaluaron después de la limpieza de la superficie del lecho por "raspado" y "arado". Adicionalmente dos plantas a escala real con limpieza por raspado fueron evaluadas; dichas plantas fueron: planta de la Parcelación Cañas gordas y la del Colegio Colombo Británico, localizadas al sur de Cali en el sector de Pance.

Las unidades piloto fueron alimentadas con agua cruda procedente del río Cauca; mientras que las plantas a escala real captan agua de canales de derivación del río Pance.

Los parámetros y variables de la investigación se presentan en la tabla 3.1. La frecuencia para los parámetros y los puntos de muestreo se relacionan en la tabla 3.2.

Tabla 3.1 Parámetros y Variables de la Investigación

Objetivo	Parámetros	Unidad	Variables Independientes	Valor de la Variable Independiente
1	Turbiedad Coliformes Fecales Recuento de bacterias Recuento de algas Recuento de protozoos Nitratos Fosfatos Caudal Tiempo que demora la limpieza	UNT UFC/100 ml # org/cm ³ arena # org/cm ³ arena # org/cm ³ arena mg/l mg/l l/s Horas	Velocidad de filtración Técnica de limpieza Altura del lecho filtrante Espesor de raspado Tamaño efectivo del lecho Edad del medio filtrante	0,15 m/h Raspado 1,0 m 2 - 3 cm 0,15 mm <i>Filtro Piloto:</i> Arena recién instalada 1 mes <i>Plantas Escala Real:</i> Arena en operación continúa mayor a 1 año
2	Turbiedad Coliformes Fecales Recuento de bacterias Recuento de algas Recuento de protozoos Nitratos Fosfatos Caudal Tiempo que demora la limpieza	UNT UFC/100 ml # org/cm ³ arena # org/cm ³ arena # org/cm ³ arena mg/l mg/l l/s Horas	Velocidad de filtración Técnica de limpieza Altura del lecho filtrante Tamaño efectivo del lecho Edad del medio filtrante Velocidad de lavado superficial Velocidad de lavado de fondo Altura de agua sobrenadante para limpieza	0,15 m/h Arado 1,0 m 0,15 mm <i>Filtro Piloto:</i> Arena recién instalada 1 mes A fijarse A fijarse 0,30 m

Tabla 3.2 Puntos de Muestreo y Frecuencias para los Parámetros de Evaluación en los Filtros Piloto y Plantas a Escala Real

Parámetro	Punto de Muestreo			
	Agua de Entrada	Dentro de la Unidad (superficie de arena)	Salida de la Unidad	Total
Turbiedad (UNT)	8d		8d	16d
Coliformes Fecales (UFC/100 ml)	6d		6d	12d
Recuento de Algas (org/cm ³ arena)		4d		4d
Recuento de Protozoos (org/cm ³ arena)		4d		4d
Recuento de Bacterias (org/cm ³ arena)		4d		4d
Nitratos (mg/l)		4d		4d
Fosfatos (mg/l)		4d		4d
Caudal (l/s)	1d			1d

d: Muestras diarias

- Nota: 1. Se inició el muestreo en el instante que el filtro sale de operación para limpieza. El muestreo se detuvo en el instante en que el número de colifecal es el mismo para las condiciones iniciales.
2. Se evaluaron dos limpiezas en los Filtros Piloto y otra en Planta a escala real en un período total de tres meses.

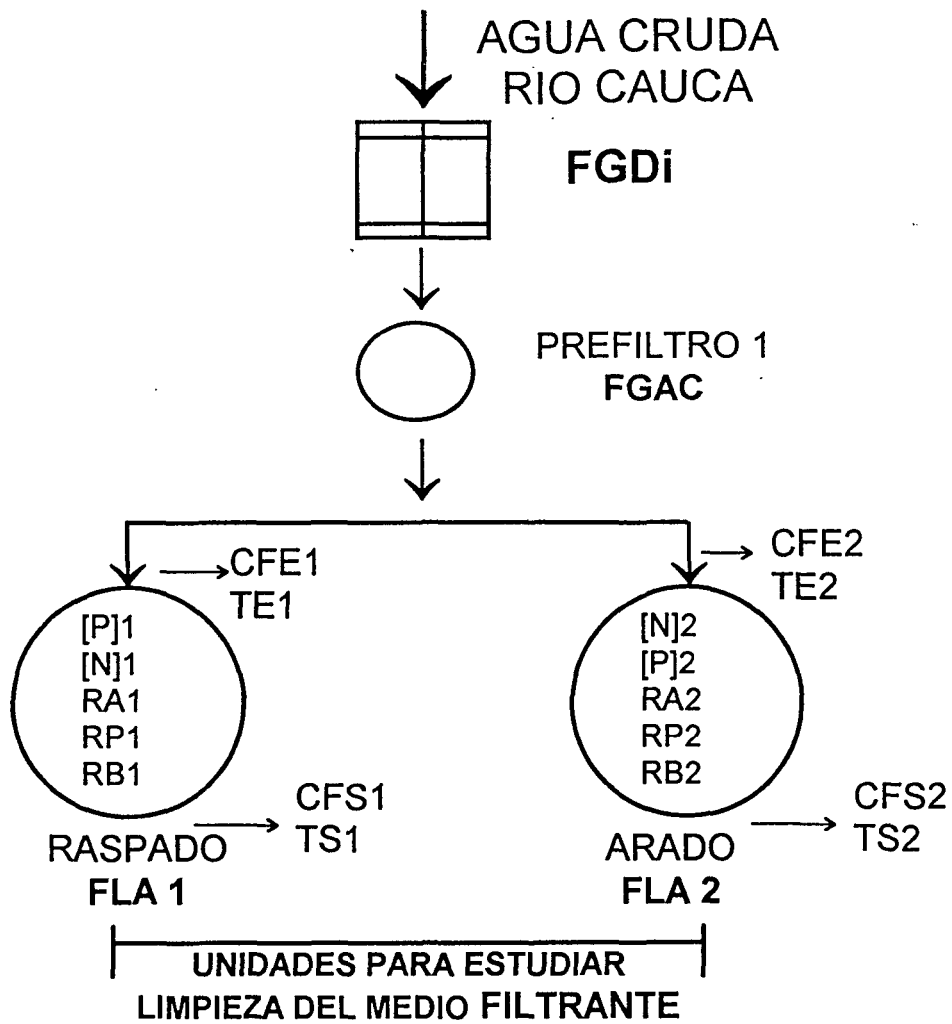
3.2 DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

3.2.1 Filtros Piloto

Para el estudio de la limpieza del filtro a nivel de laboratorio, dos unidades piloto de filtración lenta en arena fueron construidas; las unidades funcionaron en paralelo y se antecedieron de una unidad de filtración dinámica (FGDi) y una unidad de filtración gruesa ascendente en capas (FGAC) (Figura 3.1). En la unidad 1 se evaluó la limpieza por raspado del filtro y en la unidad 2 se evaluó la limpieza por arado, para lo cual se hicieron acondicionamientos especiales del F.L.A 2 piloto, (Figura 3.2). Las características de los filtros 1 y 2 se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características de los Filtros Piloto 1 y 2

Característica	Valor
Material de construcción	Ferrocemento
Forma	Circular
Diámetro	2 m
Altura Total	2.10 m
Altura del Lecho Filtrante	1.00 cm
Altura del Lecho de Soporte	25 cm
Pérdida de Carga disponible	70 cm
Borde Libre	15 cm
Velocidad de Filtración	0.15 m/h
Tamaño efectivo del Medio Filtrante (d10)	0.15 mm
Coefficiente de Uniformidad del Medio Filtrante (CU = d60/d10)	2.4
Porosidad del Medio Filtrante	0.48



CFE: Coliformes Fecales de Entrada	TS: Turbiedad a la salida
TE: Turbiedad de Entrada	RA: Recuento de algas
[N]: Concentración de Nitratos	RP: Recuento de protozoos
[P]: Concentración de Fosfatos	RB: Recuento de Bacterias
CFS: Coliformes Fecales a la salida	

Figura 3.1 Unidades Piloto de Experimentación y Puntos de Muestreo

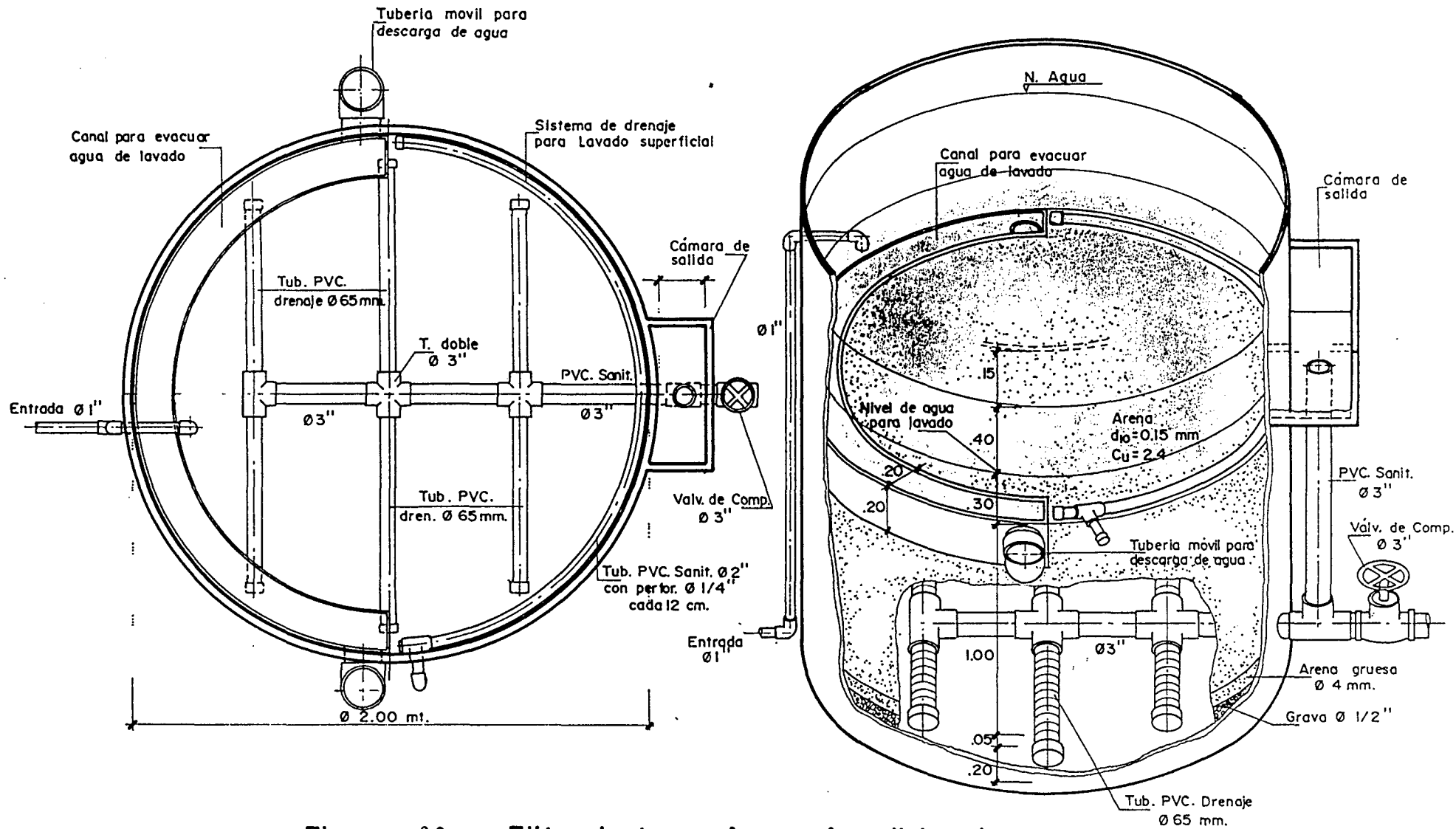


Figura 3.2 Filtro Lento en Arena Acondicionado para Limpieza por Arado.

3.2.2 Plantas a Escala Real

3.2.2.1 Planta de Tratamiento del Colegio Colombo Británico, Cali

Esta planta está localizada al sur de Cali a las afueras de la ciudad y suministra agua a un Colegio con una población estudiantil de 1200 estudiantes, el caudal de diseño del sistema es de 1,0 l/s. Esta planta utilizaba sustancias Químicas para el tratamiento con un muy pobre eficiencia y altos costos de operación. En 1987 la planta fue modificada con una combinación de etapas de tratamiento que incluye filtración gruesa dinámica (FGDi, dos unidades), filtración gruesa ascendente en capas (FGAC 2 unidades) y filtración lenta en arena (F.L.A, 2 unidades); la planta es de forma rectangular y fue construida en concreto reforzado, (Figura 3.3). El agua cruda tiene una turbiedad promedia de 20 UNT, con valores picos hasta de 120 UNT, el conteo promedio de coliformes fecales es de 58635 UFC/100 ml con valores máximos de 281600 UFC/100 ml (Para un período de evaluación de 3 años). Las características de la Planta se presentan en la Tabla 3.4.

3.2.2.2 Planta de Tratamiento de la Parcelación Cañasgordas

Está localizada al sur de Cali, abastece 150 viviendas de estrato social alto. Esta planta es una optimización de una planta F.L.A. con limitaciones en diseño, operación y mantenimiento, la cual estuvo fuera de funcionamiento cerca de dos años. La optimización realizada en el año de 1990, consistió en la proyección de un sistema de filtración dinámica (FGDi) y filtración gruesa ascendente en capas en dos Fases (FGACS), adición de una nueva unidad de F.L.A. y optimización de dos módulos de F.L.A. con muros en talud de 60. Las unidades de pretratamiento se localizaron antes de F.L.A. a fin de acondicionar el agua y proteger la carrera de los filtros lentos. En la Figura 3.4 se presenta un esquema con los componentes de la planta. El agua cruda tiene una turbiedad promedia de 13 UNT, con valores pico hasta de 75 UNT. El conteo promedio de coliformes fecales es de 5786 UFC/100 ml con valores

máximos de 100.000 UFC/100 ml(para un año de registro) . Las características de la Planta se presenta en la Tabla 3.4

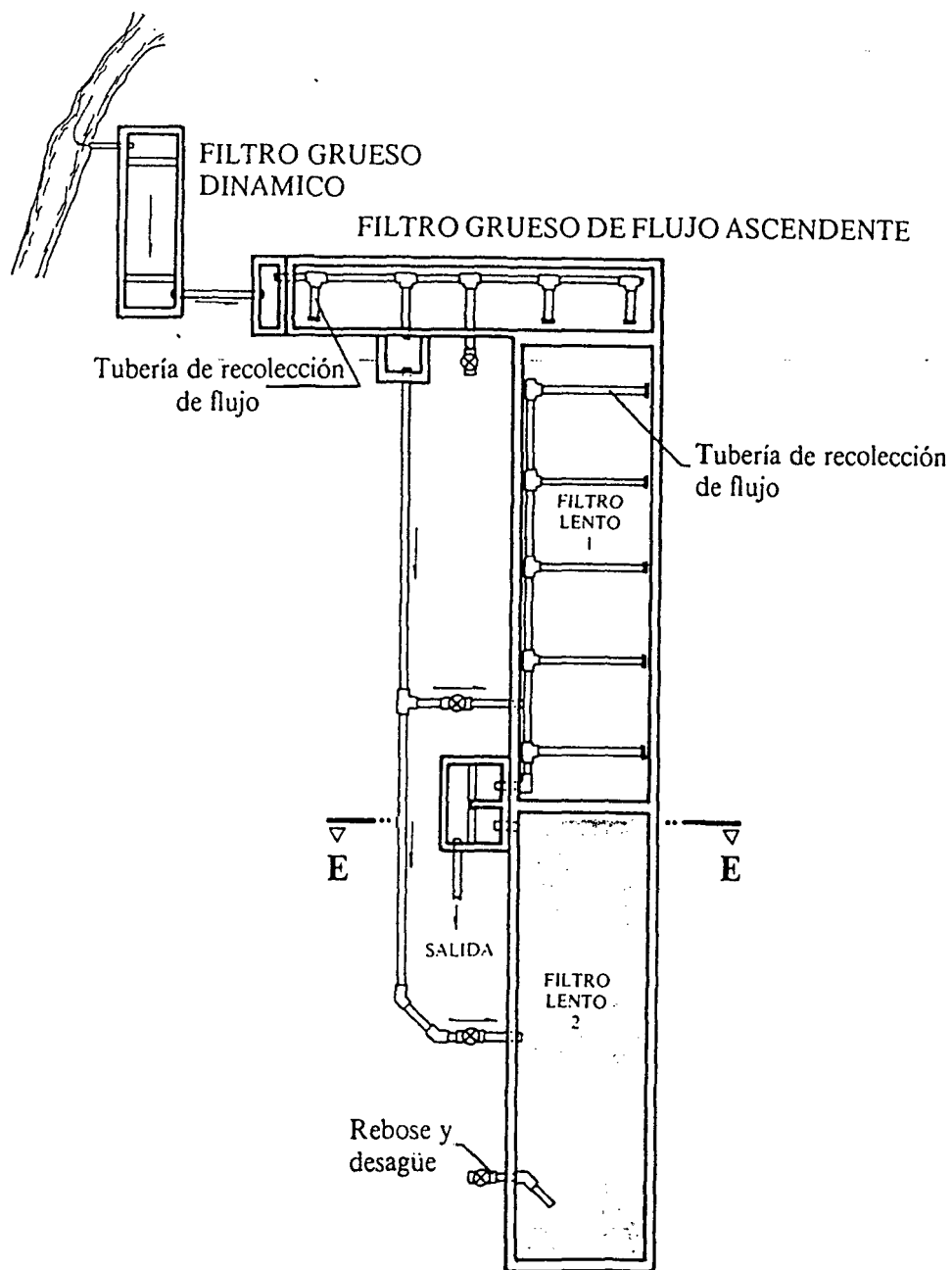


Figura 3.3.: Esquema de la planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.

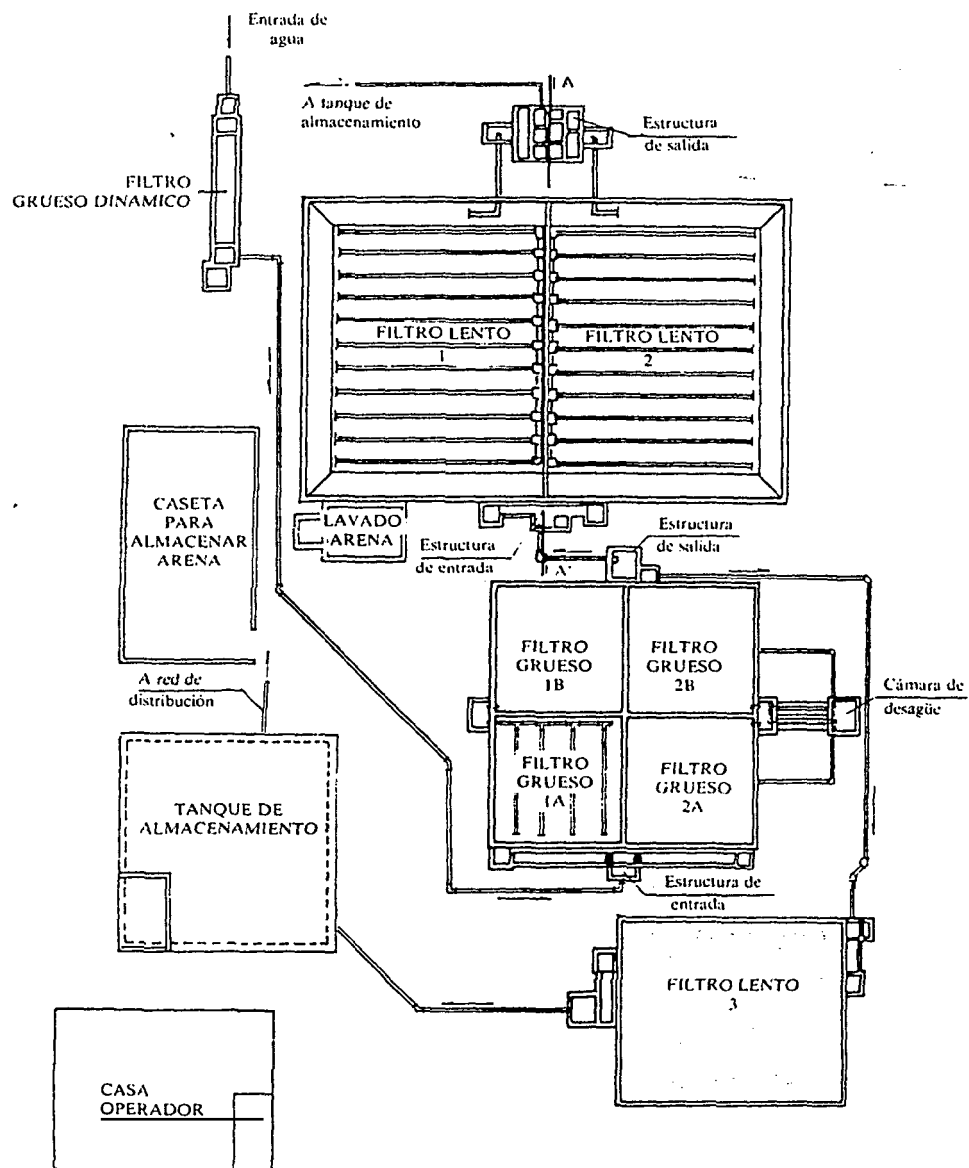


Figura 3.4 Esquema de la planta de tratamiento de la Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.

Tabla 3.4 Características de las Plantas a Escala Real

Planta	Caudal de Diseño (l/s)	Fuente de Agua Cruda	Sistema de Pretratamiento Instalado	Número de Unidades F.L.A.	Area Total F.L.A. (m ²)	Altura del Lecho de Arena Inicial (m)	Altura del Lecho de Soporte (m)	Altura Mínima del Lecho de Arena (m)	Tasa de Filtración F.L.A. m ³ /m ² /h
Colegio Colombo Británico	1,0	Río Pance (Canal de Derivación)	FGDi (2) FGAC (2)	2	24	1,20	0,20	0,60	0,15
Parcelación Cañasgordas	10,1	Río Pance (Canal de Derivación)	FGDi (1) FGAS 2	3	249	1,0	0,20	0,60	0,15

FGDi : Filtro Grueso Dinámico

FGAC : Filtro Grueso Ascendente en Capas

FGAS2 : Filtro Grueso Ascendente en Serie (2 etapas)

3.3 PROCEDIMIENTOS

Las unidades piloto operaron a una velocidad de filtración de 0,15 m/h. Las plantas a escala real operaron a la tasa de filtración de operación establecida por los operarios normalmente para garantizar el suministro de agua a la población. Los filtros piloto operaron 110 días y un total de dos limpiezas por unidad se lograron evaluar en la investigación. En las plantas a escala real se logró la evaluación de una sola limpieza del filtro, dado que las carreras de filtración normales son de 2 a 3 meses, tiempos bastante largos en relación al tiempo empleado para la experimentación (3 meses).

Antes, y después de cada limpieza las muestras de agua en las unidades piloto y plantas a escala real fueron tomadas simultáneamente en los diferentes puntos de muestreo (afluente, en el lecho filtrante y el efluente). Las muestras fueron llevadas al laboratorio para la realización de los respectivos análisis. En las plantas a escala real se midió y se sembró en campo la turbiedad y coliformes fecales respectivamente, los otros parámetros de medición se hicieron en laboratorio. Para el cumplimiento de los objetivos se procedió de la siguiente manera:

- i) Se controló y midió el caudal afluente a cada una de las unidades piloto y plantas a escala real.
- ii) Se sacaron de operación las unidades piloto y plantas a escala real, cuando el nivel de agua sobrenadante en las unidades llegó al máximo nivel de agua permisible (70 cms).
- iii) Se cronometra el tiempo, desde el instante en que el filtro salió de operación hasta que reanudó su funcionamiento normal.
- iv) En el instante antes de sacar el filtro de operación se tomaron muestras de agua afluente y efluente para medición de turbiedad y coliformes fecales.

- v) Se drenó el filtro y se procedió a tomar muestras de 1 cm^3 de arena superficial antes de la limpieza para la medición de: Nitratos, fosfatos, recuento de algas, recuento de protozoos y recuento de bacterias en placa.
- vi) Terminada la limpieza del filtro se introdujo agua por el fondo del filtro hasta que el nivel de agua en la superficie llegó a 2 cms sobre el nivel de arena, instante en el cual se tomaron muestras de 1 cm^3 de arena superficial, para medición de: Nitratos, fosfatos, recuento de algas, protozoos y bacterias; posteriormente se continuó el muestreo acorde con las frecuencias que se presentan en la Tabla 3.2
- vii) Reanudada la operación del filtro se esperó hasta que saliera el primer efluente de agua en la cámara de salida, instante en el cual se tomó la muestra de agua afluente y efluente para la determinación de coliformes fecales y turbiedad, se continuó el muestreo de estos parámetros conforme a las frecuencias que se presentan en la Tabla 3.2.

3.3.1 Muestreo

El muestreo en la superficie del lecho filtrante se realizó de la siguiente manera:

Para los parámetros: Nitratos, fosfatos, recuento de protozoos, recuento de algas y recuento de bacterias en placa, el filtro se dividió en cuatro partes iguales y con un frasco plástico con capacidad para 1 cm^3 se extrajo de cada parte una muestra de 1 cm^3 de arena superficial, posteriormente en el laboratorio y en un frasco estéril de 100 ml se mezclaron las cuatro porciones de arena extraída para integrar la muestra; posteriormente se extrajo nuevamente cada porción de 1 cm^3 de arena integrada procediéndose a los análisis así: 1 frasco de 1 cm^3 se empleó para medición de nitratos y fosfatos, 1 frasco de 1 cm^3 se empleó para recuento de algas, 1 frasco de 1 cm^3 se empleó para recuento de protozoos, 1 frasco de 1 cm^3 se empleó para recuento de bacterias en placa.

Las mediciones se suspendieron cuando el efluente del filtro lento alcanzó el nivel de coliformes fecales que tenía antes de la limpieza. Dicho parámetro se siguió como variable de control por que este tipo de microorganismos es el indicador de contaminación bacterial universalmente aceptado (WHO, 1983) y además por ser un indicador del período de maduración recomendado en la literatura por varios autores (Collins et al, 1991; Bellamy et al, 1985; Lloyd, 1974).

3.3.2 Procedimiento de limpieza

3.3.2.1 Raspado

- . Las pruebas se iniciaron cada vez que el filtro salió de operación al llegar a su nivel máximo de pérdida de carga permisible (70 cms).
- . Se drenó el filtro superficialmente mediante el dispositivo "cuello de ganso" hasta el nivel de arena. Posteriormente se abrió la válvula de desagüe hasta que el nivel de agua descendió 10 cms por debajo del lecho filtrante.
- . Una vez estuvo seca la superficie del filtro con una reglilla graduada a cms se marcaron en el lecho alturas equivalentes a dos centímetros para raspado. Se raspó la superficie del filtro extrayéndose entre 2 y 3 centímetros.
- . El raspado se hizo con "palines" de extremo recto y plano en toda la superficie.
- . La arena raspada se extrajo con valdes y se transportó hasta la cámara de lavado.
- . Terminado el raspado, se niveló la superficie de la arena y se introdujo agua por el fondo de la unidad para eliminar el aire atrapado en el medio filtrante, cuando el nivel de agua en la superficie del filtro llegó hasta 2 cms por encima del lecho de arena se suspendió la operación

y el filtro se puso nuevamente en operación.

3.3.2.2 Arado (FLA 2 Piloto)

Una unidad de filtración lenta en arena circular de 2 metros de diámetro fue acondicionada para evaluar la limpieza por arado (Figura 2). Se construyó un canal para descarga de agua sobrenadante de 0.20 m de ancho por 0.20 m de profundidad, se instaló un sistema de tubería para lavado superficial al lado opuesto del canal. El agua sobrenadante se drenó por un sistema móvil adaptado a los extremos del canal de descarga.

Una vez el filtro finalizó su carrera de filtración, al llegar a su valor máximo de pérdida de carga permisible (0.70 m) se sacó de operación suspendiendo la entrada de agua al sistema. Terminada esta acción el agua sobrenadante se drenó superficialmente por el sistema móvil instalado a los extremos del canal hasta que el nivel de agua descendió a una altura de 30 cm sobre el lecho filtrante, inmediatamente se procedió al rastrillado del área superficial del lecho filtrante para generar resuspensión del material depositado y adherido. El rastrillo empleado tenía 14 ganchos separados 3 cms, con un largo de 5 cms por gancho. Paralelo a la acción de rastrillado se introdujo agua por el fondo y la superficie del filtro procedente de la salida de una unidad de F.L.A. a una tasa aproximada a la tasa de operación del filtro.

Terminada la acción de rastrillado y la resuspensión de las partículas y material superficial, el agua sobrenante (0,30 cm) se evacuó por el canal bajando los tubos móviles ubicados en los dos extremos, para ocasionar una descarga súbita y minimizar la sedimentación de partículas sobre el lecho.

Cuando el agua sobrenadante se evacuó completamente, se llenó de nuevo el filtro hasta 30 cms por encima del medio filtrante y se repitió el rastrillado y toda la operación hasta que el nivel de agua descendió hasta la superficie del filtro, momento en el cual se suspendió tanto

el flujo superficial como el vertical, se niveló la arena y se introdujo agua por el fondo de la unidad hasta que el nivel de agua llegó a 2 centímetros por encima del medio filtrante y se reanudo la operación normal del filtro.

3.4 DESCRIPCION DE METODOS PARA LOS PARAMETROS EXPERIMENTALES

Las variables de calidad de agua medidas en esta investigación fueron: turbiedad, coliformes fecales, nitratos, fosfatos, recuento de algas, recuento de protozoos y recuento de bacterias. Adicionalmente se hizo control de caudal a la entrada y prueba de sedimentación en columna. Una descripción de los métodos seguidos se presentan a continuación:

3.4.1 Turbiedad

Este es un parámetro universalmente recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), para evaluar sistemas de tratamiento. El método de medición seguido es el recomendado por el Standard Methods (2130 B - 1989).

3.4.2 Coliformes Fecales

Conjuntamente con la turbiedad es el parámetro más ampliamente recomendado por la OMS para el control de la calidad de agua en sistemas de abastecimiento. De igual manera son parámetros recomendados por distintos investigadores para la medición del período de la maduración en filtros lentos de arena (Bellamy et al 1985, Collins et al 1993).

Los principales riesgos de naturaleza aguda para la salud humana asociado con sistemas de abastecimiento de agua son de tipo microbiológico. Esto comprende un amplio rango de

bacterias y entonces el conteo de coliformes fecales es comúnmente utilizado como indicador para determinar el grado de contaminación bacteriológica. El conteo de coliformes fecales se hizo por la técnica de filtración por membrana acorde con el Standard Methods (9222A); los datos se reportaron como UFC/100 ml.

3.4.3 Recuento de Bacterias en Placa

El recuento de bacterias en placa es un procedimiento para estimar el número de bacterias heterotróficas que viven en el agua y medir sus cambios durante el tratamiento. Las colonias pueden presentarse en parejas, cadenas, agrupamientos o como células simples, todas estas formas son incluidas en el termino unidades formadoras de colonias (UFC).

Se tomó un centímetro cúbico de arena en un envase plástico con esta capacidad. La muestra se introdujo en un erlenmeyer estéril de 50 ml, el cual contenía 25 ml de agua peptonada para facilitar la dilución y garantizar un medio propicio para las bacterias. Una vez introducida la muestra en el agua peptonada, la muestra se sometió a agitación por un período de 20 minutos, finalizado el procedimiento de agitación, se hicieron siembras del sobrenadante en diluciones de 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} . Las siembras se hicieron en cajas de petri con medio de cultivo NWRI AGAR (HPCA), por un período de 7 días a una temperatura de 28°C, acorde con el Standart Methods (9215 b, 1989).

3.4.4 Recuento de Algas y Protozoarios

El recuento de algas y protozoarios se hizo de la siguiente manera: De la parte superficial del filtro se extrajo una porción de arena en un recipiente plástico con un volumen de 1 cm³. Este cm³ de arena es agregado posteriormente en un frasco estéril de 100 ml, al cual se le agregó 25 ml de medio de cultivo para protozoarios. La muestra de arena con medio de cultivo se almacenó en la nevera a una temperatura de 4°C. En el momento de la lectura la muestra es

agitada por 3 minutos, para homogenizar y desprender los organismos que están adheridos a los granos de arena. El recuento se hizo con base a la metodología reportada por Salvado et al 1992 y Madoni,1994 tomando cuatro submuestras de 20 μ l medidos por micropipeta. La muestra se colocó en un porta objetos y se cubrió con una laminilla de 1 cm x 1 cm y un milímetro de espesor. Se observó la muestra al microscopio con los objetivos 10X y 40X. Se marcó el punto de inicio y se hizo un barrido de la placa de derecha a izquierda tal como se indica en la figura 3.5.

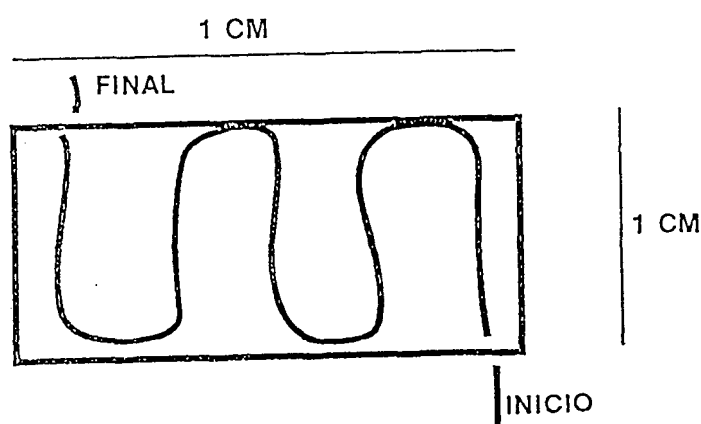


Figura 3.5 Lectura de Algas y Protozoos en la Placa

Se reportaron los organismos que se observaron en el objetivo 10X y 40X. El número de organismos encontrados en la placa se multiplicó por un factor de dilución 1250 para reportar los datos como # org/cm³ arena.

3.4.5 Nitratos

El método seguido para la determinación de nitratos es el método de la reducción del cadmio por determinación espectrofotométrica. La muestra de 1 cm³ arena tomada de la parte superficial del filtro se agregó a un frasco plástico (previamente lavado con H₂SO₄ concentrado y agua destilada) que contenía 200 ml de agua destilada, cuando se almacenó por largo período

de tiempo (más de 48 horas) se adicionaron 2 ml de ácido sulfúrico concentrado y se almacenó a 4°C. La muestra se sometió a agitación por 5 minutos, el pH de la muestra se llevó a un rango de 7.5 - 8.0 unidades con hidróxido de sodio 0.1 N y posteriormente se filtró con bomba de vacío en un filtro de membrana de poro de 0.45 µm, para facilitar la lectura por el colorímetro; el rango de precisión del método es de 0.0 a 4.5 mg/l NO₃⁻. El método seguido corresponde al reportado por el Standard Methods (4500 - NO₃⁻ E; 1992).

3.4.6 Fosfatos

La determinación de Fosfatos se hizo por el método de la reducción del cloruro estanoso. Este método sirve para la determinación de los ortofosfatos, los cuales representan la forma más común del fósforo que se halla en las aguas naturales. Los ortofosfatos incluyen los tres productos de ionización del ácido fosfórico, H₂PO₄⁻, HPO₃⁼ y PO₄⁼, cuyas concentraciones relativas en el agua están en relación con el pH. La concentración mínima determinable es de 0.005 mg P-PO₄⁻/l. El rango detectable es de 0.007 - 0.2 mg P-PO₄⁼/l. El tratamiento de la muestra de 1 cm³ arena colectada de la parte superficial del filtro, es similar a la realizada para nitratos. La muestra en vez de filtrarse, se procedió a centrifugarla. El método seguido para el análisis es el reportado por el Standard Methods (4500-P-D; 1992).

3.4.7 Medición de Caudal

Se midió el caudal diariamente a la entrada de cada unidad de filtración tanto a escala piloto como a escala real. El método seguido fue el procedimiento volumétrico.

3.4.8 Preparación del Medio Filtrante

A la arena empleada en las unidades Piloto de Filtración Lenta se le realizaron análisis granulométricos, se le determinó la densidad y se calculó su porosidad. A las unidades 1 y 2

por ser de un tamaño considerable, el medio filtrante se agregó por volumen y no por peso como se recomienda en la literatura (Lang et al, 1993). Una vez instalada la arena, antes de iniciarse la operación de los filtros, se colocó en la superficie del filtro dos centímetros de arena con biopelícula desarrollada, procedente del raspado de dos filtros piloto con lecho maduro, con el objetivo de acelerar el proceso de maduración y poder iniciar las mediciones de la limpieza del filtro en un periodo de 30 a 45 días.

3.4.9 Prueba de Sedimentación en Columna

Este método indirecto fue utilizado para establecer la sedimentación y frecuencia de distribución de las velocidades de asentamiento de las partículas que se encuentran en la parte superficial de una unidad de filtración lenta en arena.

Para la realización de la prueba se tomó la totalidad de la arena procedente del raspado de una unidad piloto de F.L.A. La cantidad de arena extraída de 0.063 m^3 equivalentes a una altura de raspado de 2 cm se lavó con 65 litros de agua destilada hasta ocasionar el desprendimiento de las partículas. Para esto se hizo agitación manual por un periodo de 20 minutos, la suspensión de partículas con agua destilada se introdujo posteriormente en una columna de sedimentación en acrílico con un diámetro de 0.30 m y 1.0 m de profundidad con cuatro llaves localizadas a 0.26, 0.46, 0.61 y 0.71 m por debajo de la superficie del agua.

3.4.10 Determinación de la Densidad del Sedimento Localizado en un F.L.A.

Terminada la prueba de sedimentación en columna se captó el lodo depositado en el fondo y se trasladó a un cono imhoff. El sedimento se extrajo cuidadosamente y se sometió a secado durante 24 horas a 110°C , el procedimiento seguido para el cálculo de la densidad fue el gravimétrico (Guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos, Univalle, Sánchez G. 1990). Los equipos y materiales empleados en la investigación se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Lista de Materiales y Equipos

A. Filtros Piloto 1 y 2

1. Filtros circulares (diámetro = 2m; altura = 2.1 m) * 2, en ferrocemento
2. Arena: Tamaño efectivo = 0.15 mm
Coeficiente de uniformidad = 2.4
Volumen = 5 m³ aprox.
3. Grava ϕ 1/2 pulg. = 0.65 m³ aprox.
4. Sistema de recolección (ϕ 4" PVC sanitaria como tubería principal recolectores en tubería PVC drenaje ϕ de 100 mm con orificios de 1,3 mm * 3 mm.

B. Equipos y Reactivos

1. Columna de sedimentación (ϕ 0.30 m, h = 1.0 m) * 1
2. Turbidímetro (HACH 2100 A) *1
3. Spectrofotómetro (Shimadzu UV - 120 - 01) * 1
4. Agitador magnético (Restsch EM 1100 - T)
5. Equipo de vacío para sólidos * 1
6. Cronómetro digital * 1
7. Balanza analítica (Sauter) * 1
8. Balanza sartorius * 1
9. Estereoscopio (Olimpus SZ - PT) * 1
10. Microscopio (Pleuger - Belgium XSZ - 107)
11. Baño María tipo JB4 (1) Grant * 1
12. Lupa - IUL * 1
13. Estufa (1 Dies - 150°C)
14. Cajas de petri Steriplan 100 * 15 mm
15. Muestreadores plásticos de 1 cm³ * 20
16. Medio de cultivo NWRI Agar (HPCA)
17. Medio de cultivo para protozoarios rico en nutrientes
18. Medio de cultivo Membrane Lauryl Sulphate Broth
19. Vortex Genie 2 * 1
20. Whatman Filter Paper (934 AH, 1.2 μ m)
21. Filtros de membrana (Gelman ϕ 47 mm, tamaño de poro 0.45 μ m)
22. Desecador * 1
23. Equipo para análisis de coliformes fecales (Del Agua) * 1

4. RESULTADOS

Los resultados se han organizado en cinco (5) partes correspondientes a: i) Efecto de la limpieza del filtro sobre la eficiencia de tratamiento en la cual se presenta el comportamiento del agua afluyente a las unidades F.L.A. durante la evaluación y el comportamiento de los coliformes fecales y la turbiedad; ii) Condiciones microbiológicas del medio filtrante superficial antes y después de la limpieza; se muestra el patrón de recuperación de las algas, protozoos y bacterias antes y después de la limpieza; iii) Relación entre la población microbiológica en el medio filtrante y la eficiencia de tratamiento, en esta parte se muestra el efecto de la limpieza del filtro sobre las poblaciones de algas, protozoos y bacterias y su relación con la remoción de coliformes fecales después de la limpieza cuando se alcanza el período de maduración; iv) Comportamiento de los nutrientes, en donde se presenta la variación de nitratos y fosfatos y su efecto sobre el índice de crecimiento de algas y protozoos y v) Condiciones de operación y mantenimiento en cada prueba en donde se presenta las condiciones que afectan la operación de limpieza tanto para raspado como para el arado del filtro.

4.1 EFECTO DE LA LIMPIEZA DEL FILTRO SOBRE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO

4.1.1 Calidad del Agua Afluyente a las Unidades F.L.A.

Todas las unidades F.L.A. tanto a escala piloto como a escala real estuvieron antecedidas de sistemas de pretratamiento en grava. Por consiguiente el agua afluyente a cada unidad de F.L.A. fue acondicionada previamente. Los filtros piloto recibieron agua pretratada procedente del río Cauca, el cual se caracteriza por ser altamente poluido y presentar fuertes variaciones en turbiedad (valores entre 14 UNT Y 903 UNT) y coliformes fecales (valores entre 12500

UFC/100 ml y 320000 UFC/100 ml). Los F.L.A de las plantas a escala real reciben agua acondicionada proveniente del río Pance, el cual presenta mejores características de calidad, con turbiedades que varían entre 2 Y 45 UNT y coliformes fecales entre 460 y 44000 UFC/100 ml, presentando mejores características de calidad que los F.L.A. Piloto. En la tabla 4.1 se presentan los valores máximos, mínimos y promedios para los parámetros de turbiedad y coliformes fecales afluentes a cada unidad evaluada para las diferentes pruebas realizadas y por cada técnica de limpieza estudiada.

Tabla 4.1 Calidad del Agua Afluente a Cada Unidad F.L.A. Evaluada

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA #	PARAMETRO							
			COLIFORMES FECALES(UFC/100ml)				TURBIEDAD			
			Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación STD.	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación STD.
Raspado	F.L.A.1 Piloto	1	9130	60	1195	1464	43	8,5	20,2	8,7
		2	2920	340	1368	710	41	5,9	16,1	9,7
Arado	F.L.A.2 Piloto	1	4020	272	1510	1021	41	6,9	16	9,2
		2	3410	270	1261	1005	9,1	4,0	6,6	1,21
Raspado	F.L.A.2 Planta ColomboBritánico	1	900	130	447	287	3,8	1,0	2,04	0,81
	F.L.A.3 Planta Cañasgordas	1	330	5	142	133	3	1,4	2,1	0,49

Los datos consignados en la Tabla 4.1 indican que:

- i- las unidades piloto F.L.A. operaron con peor calidad que las plantas a escala real, manifestándose el impacto de la mala calidad del río Cauca sobre las barreras de tratamiento instaladas antes de los F.L.A.
- ii- Los F.L.A pilotos recibieron valores de turbiedad y coliformes fecales afluentes mayores a los reportados por la literatura.

4.1.2 Comportamiento de Coliformes Fecales y Turbiedad

La eficiencia de tratamiento en las unidades F.L.A. se midió por los parámetros de coliformes fecales y turbiedad. Los resultados en coliformes fecales y turbiedad obtenidos para cada una de las pruebas tanto a escala piloto como escala real se presentan en el Anexo 1. En las Figuras 4.1 y 4.2 se presenta el comportamiento típico de los coliformes fecales y turbiedad afluentes y efluentes después de la limpieza del filtro respectivamente; en las Figuras 1.1.1 a 1.1.12 (Anexo 1.1) se representan los resultados para cada una de las pruebas realizadas. La línea punteada en las gráficas indica la calidad del efluente en el filtro antes de la limpieza del medio filtrante. El control en las mediciones se hizo con los coliformes fecales a la salida y la calidad del efluente fue seguida hasta que se logró un valor próximo al valor de antes de la limpieza, instante en el cual se suspendió la medición de todos los parámetros.

Con base en los datos experimentales consignados en las Figura 1.1.1 a 1.1.12 (Anexo 1.1), se pueden establecer las condiciones antes y después de la limpieza del filtro cuando el filtro inicia una nueva carrera y observar el impacto sobre la eficiencia de tratamiento. En la Tabla 4.2 se presentan estas condiciones.

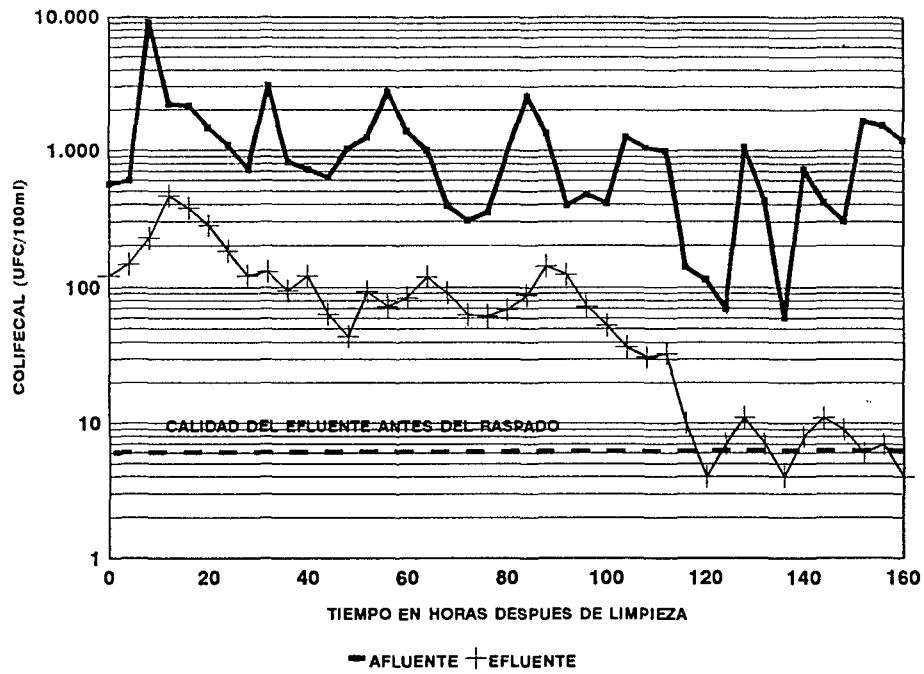


FIG 4.1 COLIFORMES FECALES DESPUES DE RASPADO.
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA1

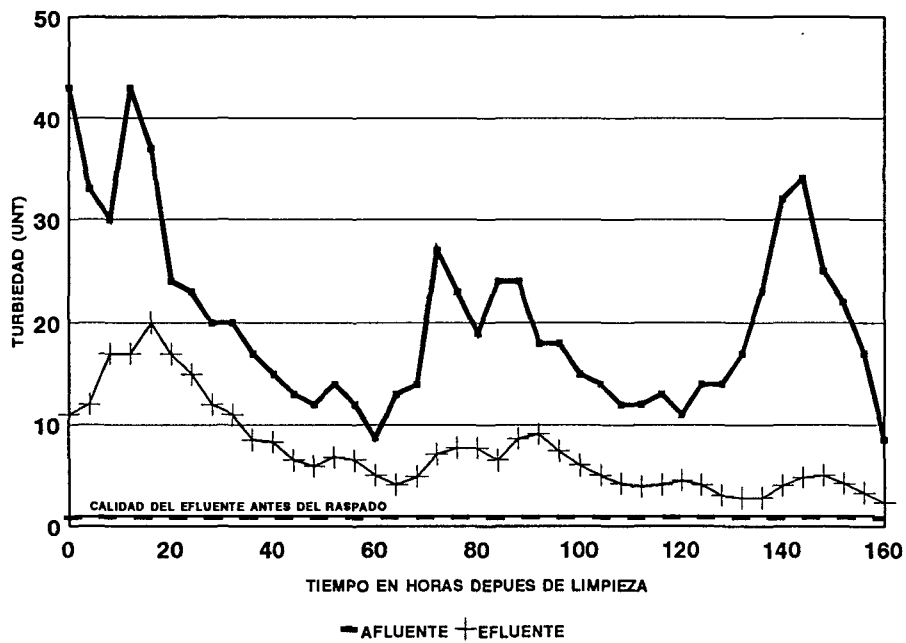


FIGURA 4.2 TURBIEDAD DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO PRUEBA 1

Tabla 4.2 Coliformes Fecales y Turbiedad Antes y Despues de la Limpieza de F.L.A.

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No.	CONDICIONES DEL FILTRO ANTES DE LA LIMPIEZA						CONDICIONES DEL FILTRO DESPUES DE LA LIMPIEZA					
			COLIFECAL (UFC/100 ml)			TURBIEDAD (UNT)			COLIFECAL (UFC/100 ml)			TURBIEDAD (UNT)		
			Entrada	Salida	Eficiencia Unid. Log.	Entrada	Salida	Eficiencia %	Entrada	Salida	Eficiencia Unid. Log.	Entrada	Salida	Eficiencia %
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	1475	5	2,47	14	2,1	85	566	121	0,67	43	11	74,4
		2	1320	2	2,82	7,5	1,0	87,7	1140	19	1,78	30	1,6	94,7
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	2470	2	3,10	37	2,2	94	4020	2128	0,27	28	2,5	91
		2	3755	1	3,57	11	1,7	84,5	3410	35	1,99	9,1	1,6	82,4
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	420	0	3,6	1,5	0,7	53,3	690	9	1,88	2,7	2	35
	F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	13	0	2,11	2,5	0,55	78	5	1	0,70	2,1	0,38	82

Los datos de calidad efluente corresponden al primer filtrado obtenido en la cámara de salida después de la limpieza. De la tabla 4.2 se observa que en algunas pruebas no se aprecia reducción en la remoción de turbiedad; esta situación se puede presentar porque al filtro se le introduce agua tratada por el fondo después de la limpieza y entonces el valor obtenido puede ser el reflejo del agua introducida o también a la que posee el filtro en su interior.

La Tabla 4.2 evidencia la disminución en la eficiencia microbiológica del filtro después de la limpieza. La Tabla 4.3 presenta dichas reducciones en eficiencia de tratamiento para cada una de las pruebas.

Tabla 4.3 Reducción en la Eficiencia de Tratamiento por Efecto de la Limpieza del Filtro

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No. 1	REDUCCION EN LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	
			COLIFORMES FECALES UNIDADES LOG.	TURBIEDAD %
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	1,80	10,6
		2	1,04	No hubo reducción
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	2,83	3,0
		2	1,58	2,1
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	1,72	18,3
	F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	No hubo reducción	No hubo reducción

De las gráficas 1.1.1 a 1.1.12 (anexo 1.1) se puede evidenciar la presencia de período de maduración para cada una de las pruebas evaluadas, tanto en coliformes fecales como en turbiedad y establecer cuanto es su duración. La tabla 4.4 presenta la duración de los períodos de maduración en cada prueba obtenidos a partir de las gráficas 1.1.1 a 1.1.12.

Tabla 4.4 Período de Maduración en F.L.A para Coliformes Fecales y Turbiedad Después de la Limpieza de un F.L.A

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No. 1	PERÍODO DE MADURACION (Horas)	
			COLIFORMES FECALES	TURBIEDAD
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	120	160
		2	142	160
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	116	124
		2	86	72
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	39	17
	F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	0	17

Con los datos de la tabla 4.1 y la tabla 4.4 es posible determinar la variación del período de maduración en función de la calidad del agua afluente a los F.L.A en las diferentes pruebas realizadas. La Figura 4.3 muestra el período de maduración en función de los coliformes fecales y la turbiedad para valores promedios en el afluente. Esta Figura indica que existe una buena correlación entre los datos ($r^2=0.95$ para turbiedad y $r^2=0.89$ para coliformes fecales) y por lo tanto hay una relación directa entre las variables, osea, entre mayor es la turbiedad y los coliformes fecales afluentes después de la limpieza, mayor será el tiempo requerido para que el filtro alcance una buena eficiencia de tratamiento.

De la Tabla 4.1 (promedio de colifecales para cada prueba), los datos de la Tabla 4.3 (reducción en remoción de coliformes fecales) y la tabla 4.4 (período de maduración para coliformes fecales) es posible establecer la relación entre los coliformes fecales afluentes, período de maduración y reducción en la eficiencia de tratamiento por el efecto de la limpieza del filtro.

En la figura 4.4 se representa dicha relación y se puede establecer que existe buena correlación ($r^2=0,70$) y por lo tanto en la medida que los coliformes fecales se incrementen en el afluente de un F.L.A hay mayor reducción en la remoción de coliformes fecales y aumento del período de maduración.

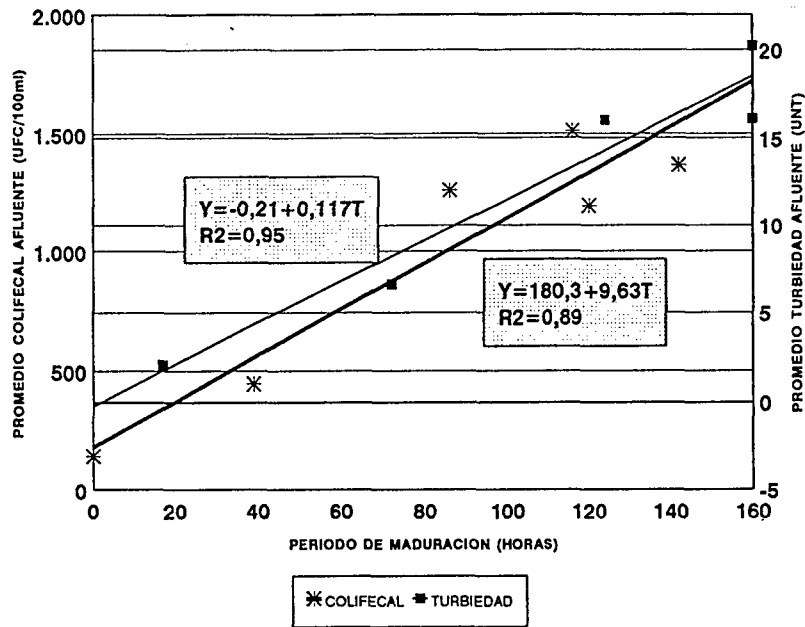


FIGURA 4.3 PERIODO DE MADURACION EN FUNCION DE COLIFORMES FECALES Y TURBIEDAD

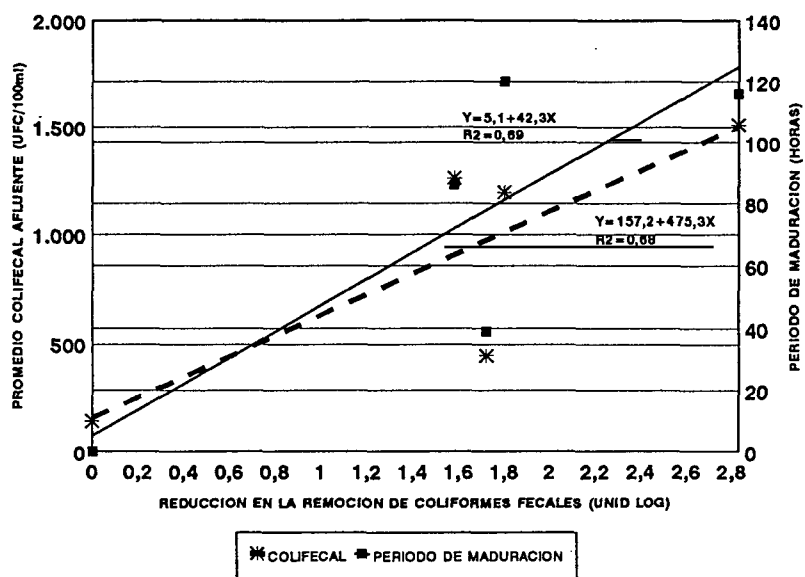


FIGURA 4.4 REDUCCION DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO EN FUNCION DE COLOFORMES FECALES AFLUENTES Y EL PERIODO DE MADURACION DESPUES DE LA LIMPIEZA DE F. L.A

4.2 CONDICIONES MICROBIOLÓGICAS DEL MEDIO FILTRANTE SUPERFICIAL DESPUÉS DE LA LIMPIEZA

4.2.1 Algas y Protozoos

Los datos experimentales obtenidos para el comportamiento de algas y protozoos después de la limpieza de cada uno de los F.L.A evaluados se presentan en el Anexo. 1. Con base a estos resultados las condiciones del medio filtrante antes y después de la limpieza superficial se presentan en la Tabla 4.5

Tabla 4.5 Condiciones de Algas y Protozoos en la Superficie del Filtro Antes y Después de la Limpieza

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No	RECUENTO DE ALGAS Unid. Log/cm ³ Arena		REDUCCION POR LIMPIEZA Unidades Log	RECUENTO PROTOZOOS Unid. Log/cm ³ arena		
			ANTES DE LIMPIEZA	DESPUES DE LIMPIEZA		ANTES DE LIMPIEZA	DESPUES DE LIMPIEZA	REDUCCION UNID. LOG.
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	5,68	0	5,68	4,82	0	4,82
		2	5,94	4,56	1,38	4,5	0	4,5
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	6,17	4,64	1,53	4,49	3,57	0,92
		2	6,33	5,86	0,47	4,97	4,78	0,19
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	7,51	6,64	0,87	7,29	6,48	0,81
	F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	6,61	6,07	0,54	6,12	5,20	0,92

De los datos consignados en la Tabla 4.5 se deduce que:

La forma de hacer la limpieza tiene un marcado efecto sobre la población de algas y protozoos; el raspado en el F.L.A. piloto produce mayor disminución en la población de algas y protozoos, siendo mayor la disminución en estos últimos.

La población de algas en todas las pruebas registra ser mayor que la población de

protozoos.

Las plantas a escala real presentan mayor población de algas y protozoos a su vez la proporción entre las poblaciones es casi 1:1. Entre las dos plantas de tratamiento la del Colombo Británico presenta mayor población tanto en algas como en protozoos.

La Figura 4.5 y 4.6 ilustra el típico patrón de comportamiento para algas y protozoos respectivamente después de la limpieza del filtro. En las Figuras 1.2.1 a 1.2.12 del anexo 1.2 se representan los resultados para las diferentes pruebas realizadas durante la evaluación.

La forma de obtener estas Figuras fue la siguiente:

- El patrón de crecimiento de las algas y protozoos se describe con la ecuación (2.2). Para obtener esta ecuación es indispensable calcular los valores de a y r ; estos valores se obtienen a partir de los datos experimentales.
- El valor k , de la asíntota superior corresponde al número de organismos presentes en el filtro antes de la limpieza.
- Los valores a y r se calculan graficando el factor $[\ln(k-n)/k]$ en función del tiempo. Los datos para cada prueba se presentan en las Figuras 1.3.1 a 1.3.12 del anexo 1.3. Los coeficientes de correlación (r) obtenidos para el cálculo de los parámetros en las diferentes pruebas están entre 0.70 y 0.97 indicando estos valores el buen grado de ajuste existente entre el modelo matemático y los datos experimentales.

De las Figuras 1.2.1 a 1.2.12 del Anexo 1.2 es posible calcular el índice de crecimiento poblacional por individuo y el período de maduración tanto de las algas y protozoos para cada

prueba realizada. Dichos resultados se presentan en la Tabla 4.6.

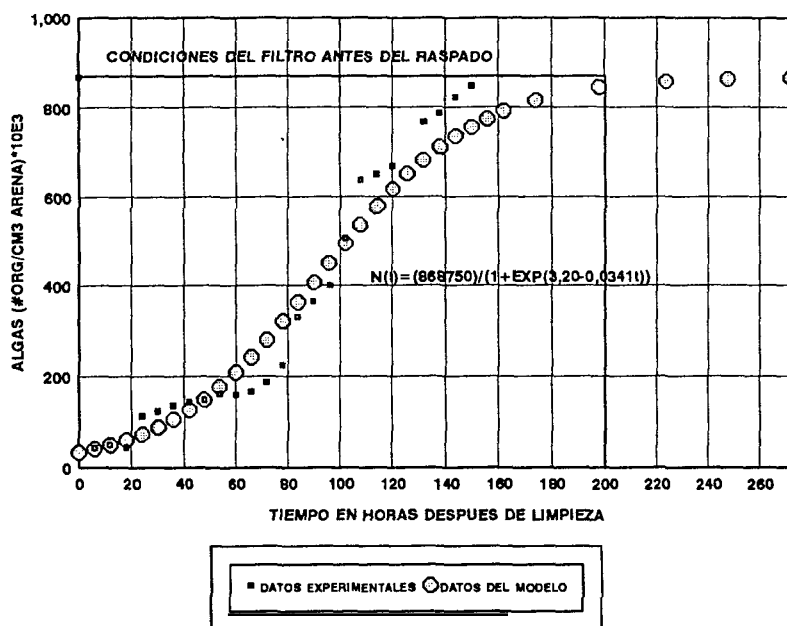


FIGURA 4.5 COMPORTAMIENTO DE LAS ALGAS DESPUES DE LIMPIEZA POR RASPADO F.L.A 1 PILOTO PRUEBA2

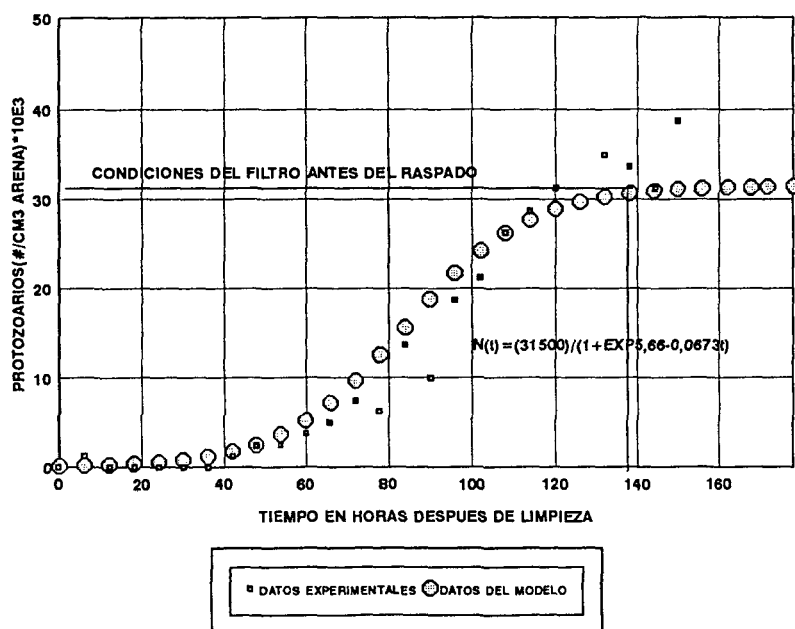


FIGURA 4.6 COMPORTAMIENTO DE LOS PROTOZOARIOS DESPUES DE LIMPIEZA POR RASPADO F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA2

Tabla 4.6: Período de Maduración e índice de Crecimiento Poblacional para Algas y Protozoos Después de la Limpieza en Sistemas F.L.A

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No	PERIODO DE MADURACION (HORAS)		INDICE DE CRECIMIENTO POBLACIONAL POR INDIVIDUO (r)	
			ALGAS	PROTOZOOS	ALGAS	PROTOZOOS
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	275	320	0,0257	0,0216
		2	200	138	0,0341	0,0673
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	128	200	0,0295	0,0211
		2	260	210	0,0139	0,0119
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	44	68	0,155	0,0698
	F.L.A 3 Planta Cañasgordas	1	48	78	0,0782	0,0639

De la Tabla 4.6 se deduce que:

- Hay una tendencia a que las algas registren menor período de maduración que los protozoos.
- Las plantas a escala real registran menor período de maduración tanto de algas como de protozoos.
- La planta del colombo británico registró los menores períodos de maduración tanto en algas como en protozoos en relación con las demás evaluaciones realizadas.

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.6 de índice de crecimiento poblacional por individuo, es posible calcular el índice finito de incremento por individuo. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.7

Tabla 4.7 Índice Finito de Incremento por Individuo para Algas y Protozoos Después de la Limpieza de Sistemas F.L.A.

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No	(*) INDICE FINITO DE INCREMENTO POR INDIVIDUO (I.F.I)	
			ALGAS	PROTOZOOS
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	1,026	1,022
		2	1,035	1,070
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	1,030	1,021
		2	1,014	1,012
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	1.168	1,072
	F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	1,081	1,066

(*) I.F.I = $\lambda = e^r$

De los valores presentados en la Tabla 7 se aprecia que el índice finito de incremento (I.F.I) tanto en algas como en protozoarios es más alto en las plantas a escala real, especialmente en la planta del colombo británico; pero no existe una diferencia marcada de los valores del I.F.I. entre las distintas pruebas.

La Figura 4.7 Presenta el período de maduración en función de la población remanente de algas y protozoos después de la limpieza del F.L.A, esta figura se ha elaborado con base a los datos de la Tabla 4.5 y 4.6 para recuento de algas y protozoos después de la limpieza y período de maduración en cada prueba respectivamente. Acorde con la Figura 4.7 se presenta una clara evidencia de la dependencia ($r^2=0,85$ para algas y protozoos) del período de maduración con relación al número de organismos tanto de algas como de protozoos después de la operación de limpieza. Entre menor sea la población de algas y protozoos después de la limpieza mayor será el período de maduración.

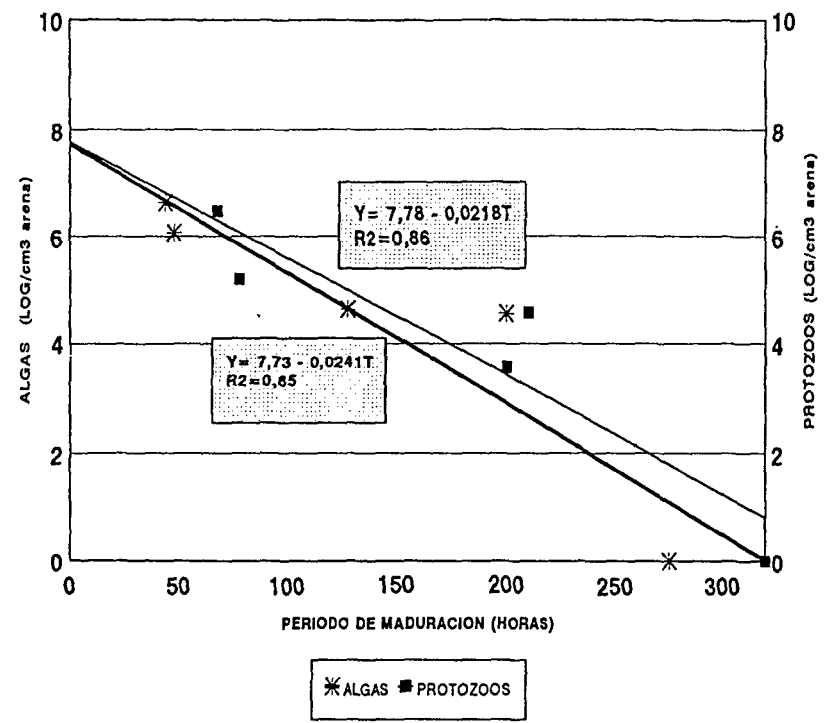


FIGURA 4.7 PERIODO DE MADURACION EN FUNCION DE LA POBLACION REMANENTE DE ALGAS Y PROTOZOOS DESPUES DE LA LIMPIEZA DE F.L.A

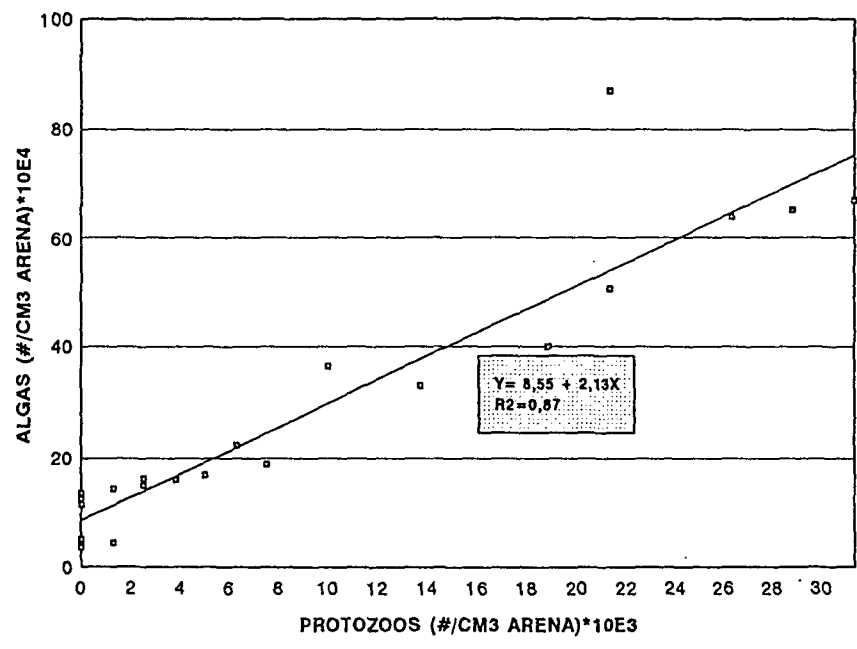


FIGURA 4.8 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS FLA 1 PILOTO LIMPIEZA POR RASPADO PRUEBA2

La Figura 4.8 es una típica representación de la correlación existente entre las algas y los protozoos (r^2 entre 0.60 y 0.87). En el anexo 1.4 se incluyen las Figuras 1.4.1 a 1.4.6 las cuales presentan la correlación que existe entre estas dos poblaciones para cada prueba. Estas Figuras indican una proporcionalidad directa entre algas y protozoos es decir a mayor numero de algas después de la limpieza mayor será también el numero de protozoos en el filtro:

4.2.2 Bacterias

El comportamiento de la población de bacterias acorde con los datos experimentales no registra el mismo patrón de crecimiento que las algas y los protozoarios. La Figura 4.9 ilustra el patrón de comportamiento de las bacterias en las pruebas realizadas. En el anexo 1.5 se presentan las Figuras que representan el comportamiento de las bacterias después de las limpiezas del filtro, estas Figuras se han elaborado con base en los datos presentados en el anexo 1. El numero de bacterias en unidades logarítmicas en función del tiempo después de la limpieza presenta un bajo ajuste o correlación con el modelo lineal (r varía entre 0.50 y 0,78), pero se aprecia tendencia hacia el incremento con el tiempo, a excepción de la planta de cañas gordas que registro un descenso de la población bacteriana después de la limpieza (ver anexo 1.5, figura 1.5.6).

Las condiciones antes y después de la limpieza de la población de bacterias se presentan en la Tabla 4.8.

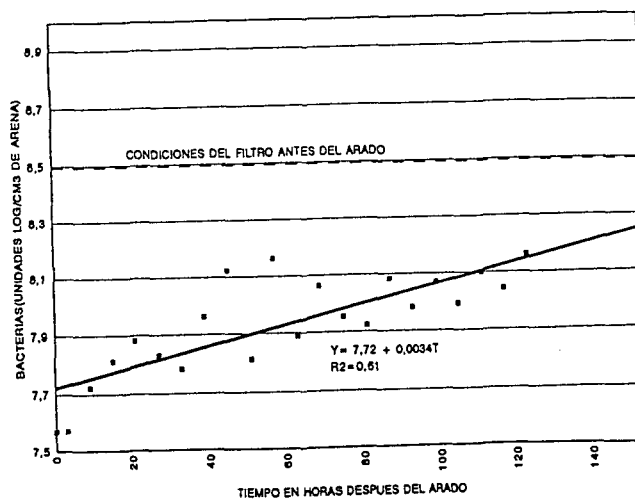


FIGURA 4.9 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO-PRUEBA1

Tabla 4.8 Población de Bacterias Antes y Después de la Limpieza de un F.L.A.

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No	BACTERIAS (UNIDADES LOG/cm ³ Arena)		
			ANTES DE LIMPIEZA	DESPUES DE LIMPIEZA	REDUCCION DE POBLACION Unid. Log.
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	8,00	6,34	1,66
		2	8,28	7,98	0,30
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	8,50	7,57	0,93
		2	9,10	8,47	0,63
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	7,32	6,73	0,59
	F.L.A 3 Planta Cañasgordas	1	8,31	7,59	0,72

De las Figuras 1.5.1 a 1.5.6, (Anexo 1.5) es posible calcular el período de maduración para las bacterias en cada prueba. La Tabla 4.9 presenta estos valores.

Tabla 4.9 Período de Maduración para las Bacterias en F.L.A.

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO TRATADO	PRUEBA No	PERIODO DE MADURACION (HORAS)
Raspado	F.L.A. 1 Piloto	1	110
		2	137
Arado	F.L.A. 2 Piloto	1	229
		2	177
Raspado	F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	48
	F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	--

La Figura 4.10 presenta la tendencia existente entre el período de maduración y la población remanente de bacterias después de la limpieza del F.L.A. Esta Figura se ha obtenido al graficar los datos de la Tabla 4.8 (columna de población de bacterias después de la limpieza) contra los

datos de la Tabla 4.9 (columna período de maduración). La tendencia de esta Figura indica que entre mayor es la población bacteriana después de la limpieza del filtro entonces mayor será el período de maduración requerido para el F.L.A.

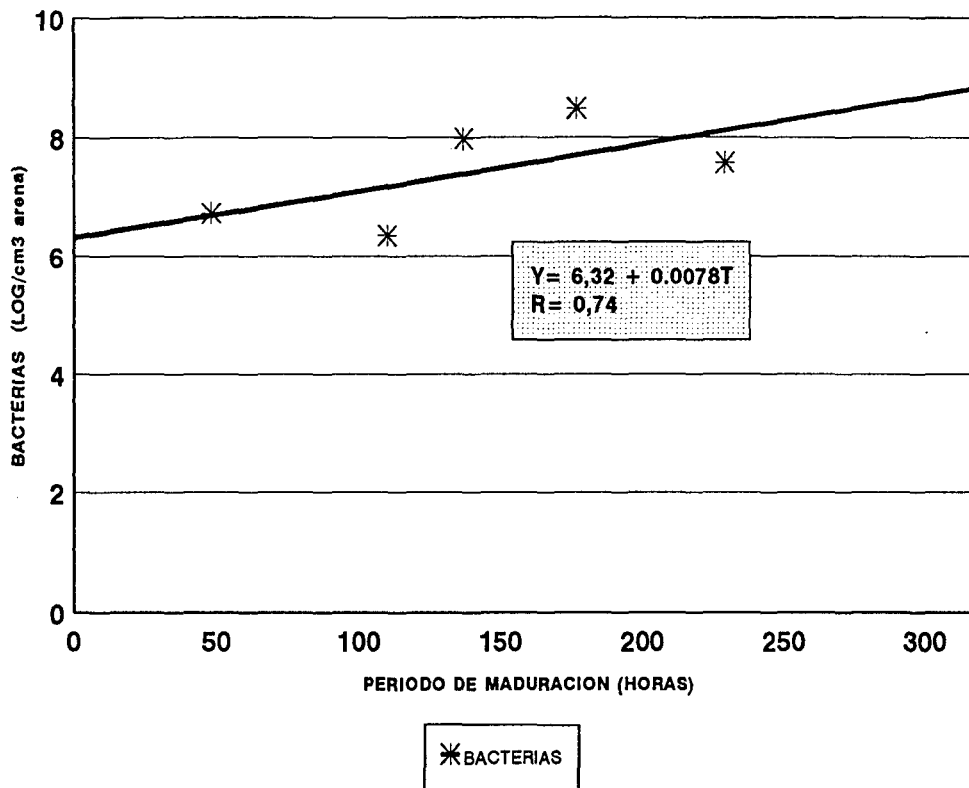


FIGURA 4.10 PERIODO DE MADURACION EN FUNCION DE LA POBLACION REMANENTE DE BACTERIAS DESPUES DE LA LIMPIEZA DE F.L.A

4.3 RELACION ENTRE LA POBLACION MICROBIOLOGICA EN EL MEDIO FILTRANTE Y LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DESPUES DE LA LIMPIEZA

Teniendo en cuenta la información consignada en la tabla 4.5 y 4.8 es posible observar la relación que hay entre los protozoos, las algas y las bacterias antes y después de la limpieza en F.L.A. Las figuras 4.11 y 4.12 muestran comparativamente dicha relación. La figura 4.11 indica que antes de la limpieza del filtro hay predominio de la población de bacterias, seguida de las algas y por último los protozoos. En las plantas a escala real, en especial en la planta del Colombo Británico se aprecia que hay más población de protozoos y la relación existente entre las diferentes poblaciones es del orden de 1:1.

Después de la limpieza (figura 4.12) hay disminución de las poblaciones, pero en especial los protozoos seguido de las algas. En las plantas a escala real la relación entre las poblaciones remanentes después de la limpieza continua siendo del orden de 1:1.

Estableciéndose en cada prueba el período de maduración para coliformes fecales (figuras 1.1.1 a 1.1.6), su eficiencia de tratamiento (Figuras 1.1.7 a 1.1.12, Anexo 1.1) y la población de algas, protozoos y bacterias (Figuras 1.2.1 a 1.2.12, Anexo 1.2 y 1.5.1 a 1.5.5, anexo 1.5) correspondientes a ese tiempo, se obtiene la Figura 4.13. De la Figura 4.13 se puede apreciar:

- i- Existe buena correlación entre la población microbiológica establecida en el filtro con la eficiencia de remoción de coliformes fecales (r^2 mayor a 0.70).
- ii- Entre mayor es la población establecida de algas y protozoos en el medio filtrante se reduce la población de bacterias y se incrementa la eficiencia de remoción de coliformes fecales.

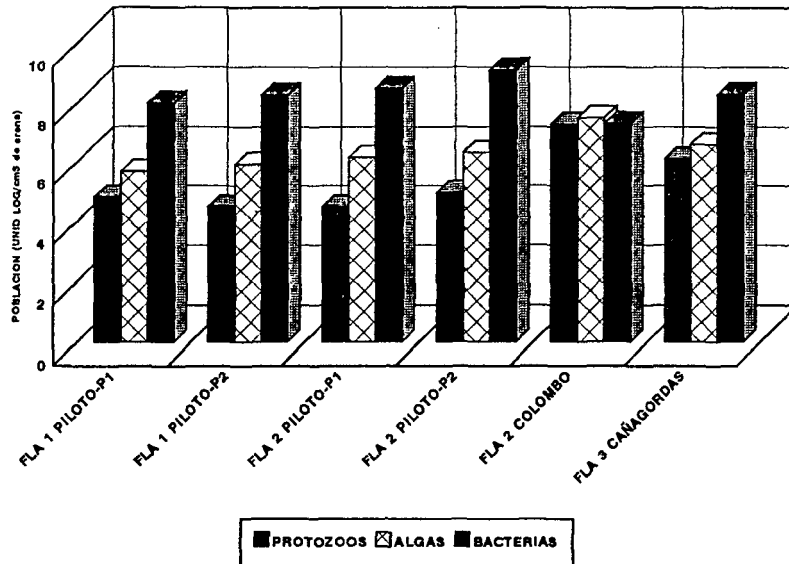


FIG 4.11 POBLACION DE ALGAS,PROTOZOOS Y BACTERIAS ANTES DE LA LIMPIEZA EN CADA F.L.A EVALUADO

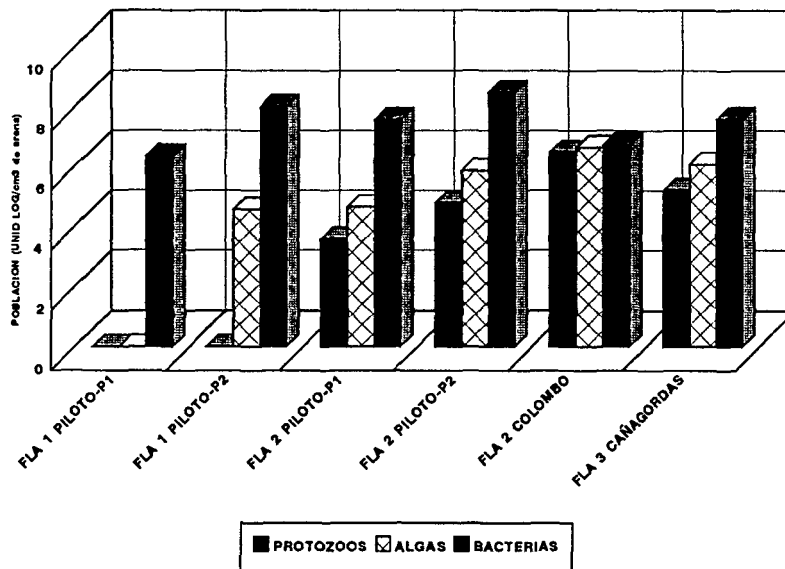


FIG 4.12 POBLACION DE ALGAS,PROTOZOOS Y BACTERIAS DESPUES DE LA LIMPIEZA EN CADA F.L.A EVALUADO

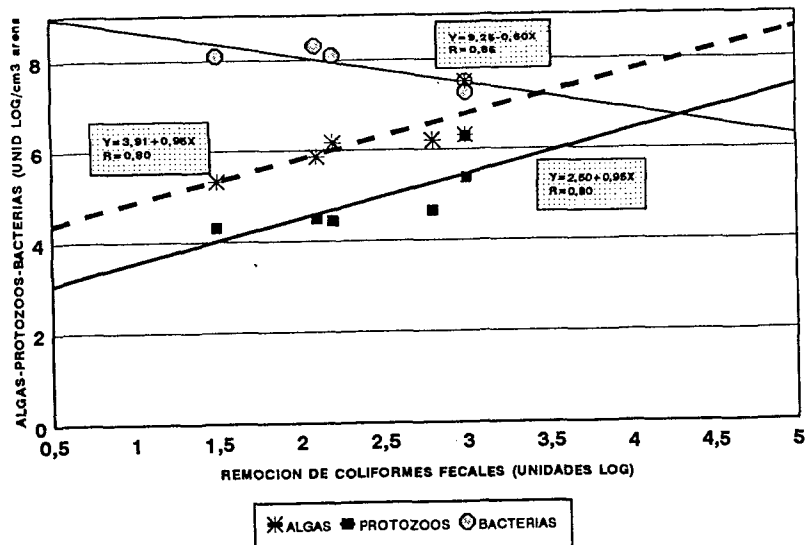


FIG 4.13 REMOCION DE COLIFORMES FECALES EN FUNCION DE LA POBLACION DE: ALGAS,PROTOZOOS Y BACTERIAS EN LA SUPERFICIE DEL LECHO FILTRANTE DESPUES DE LA LIMPIEZA DE F.L.A CUANDO SE ALCANZA EL PERIODO DE MADURACION

- iii- La población de protozoos es muy importante dado que ellos son depredadores de las bacterias.
- iv- Hay una tendencia hacia el equilibrio entre las poblaciones de algas,bacterias y protozoos a una relación 1:1 para una máxima eficiencia de remoción.

4.4 COMPORTAMIENTO DE NITRATOS Y FOSFATOS

Los datos experimentales para cada evaluación se encuentran consignados en el Anexo 1. A partir de los datos de nitratos y fosfatos se ha hecho la relación nitrógeno-fósforo como una cuantificación del nivel de nutrientes presentes en el filtro después de la limpieza. En la Tabla 1.6.1 del Anexo 1.6 se han consignado las estadísticas descriptivas para cada prueba, y con base a los datos de dicha Tabla se ha elaborado la Figura 4.14 que presenta de manera comparativa

la concentración media de nitratos, fosfatos y la relación nitrógeno-fósforo en cada evaluación. Acorde con la información de la Tabla 1.6.1 (Anexo 1.6) y la Figura 4.14, la concentración promedio de nitratos en las diferentes pruebas a variado entre 0.09 mg/l y 0.64 mg/l; para fosfatos a variado entre 0.21 mg/l y 0.56 mg/l (osea entre 210 μ g/l - 560 μ l). La relación promedio de nitrógeno-fósforo se ha cuantificado entre 0.84 y 2.61.

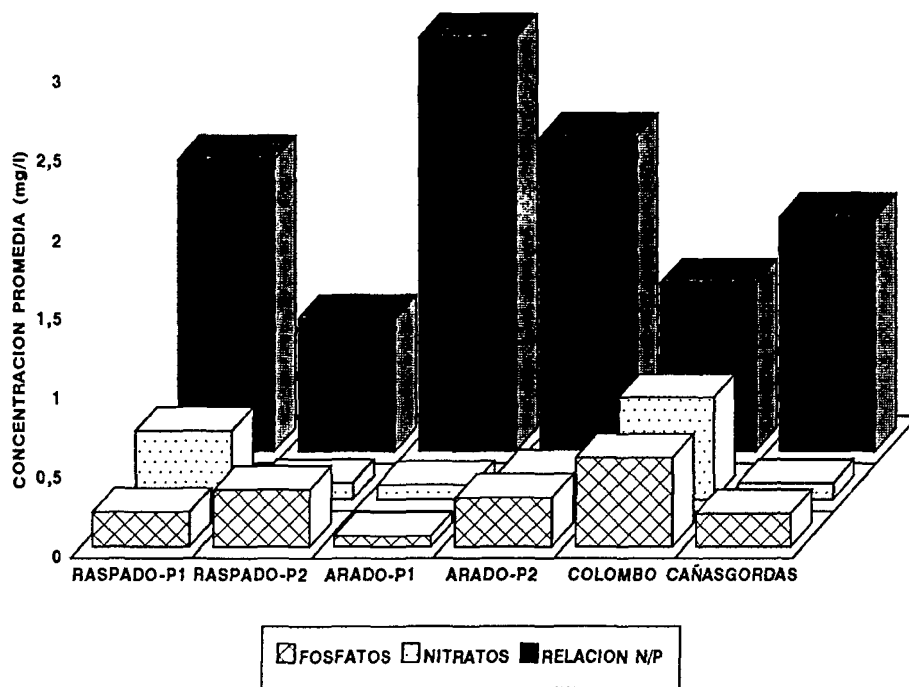


FIGURA 4.14 CONCENTRACION MEDIA DE FOSFATOS, NITRATOS Y RELACION N/P EN CADA FLA EVALUADO

Conforme al análisis estadístico de los datos consignados en el Anexo 1.6 (análisis de frecuencias de la relación nitrógeno-fósforo) se aprecia que la relación nitrógeno fósforo predominante en las diferentes pruebas a estado por debajo de 3 (entre el 70% y 90% de las veces).

De la Tabla 1.6.1, Anexo 1.6 y los resultados obtenidos de índice finito de incremento para la

población de algas y protozoos de la Tabla 4.7, se elaboró la Figura 4.15.

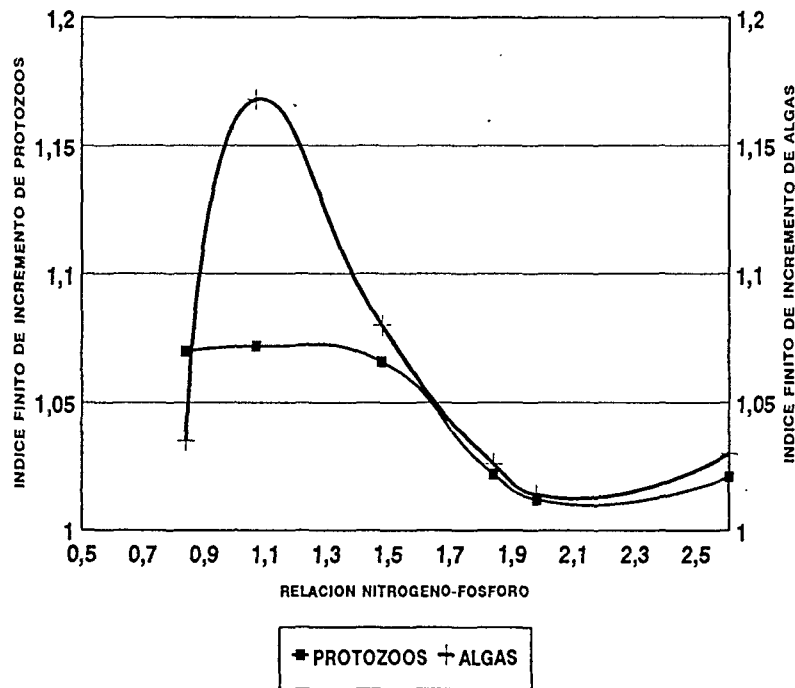


FIGURA 4.15 RELACION NITROGENO-FOSFORO EN FUNCION DEL INDICE FINITO DE INCREMENTO DESPUES DE LA LIMPIEZA EN F.L.A

De la Figura 4.15 se puede deducir que:

- . Un mayor índice finito de crecimiento de algas se ha logrado obtener con una relación nitrógeno-fósforo de 1.1.
- . La relación nitrógeno-fósforo afecta en mayor grado el crecimiento de algas que de protozoarios en el rango de 0.8 a 1.5
- . La relación óptima de nitrógeno-fósforo para protozoos se encuentra entre 0,8 y 1,5.

- . El fósforo se presenta como el factor limitante del crecimiento tanto de algas como de protozoarios.
- . En la medida que los nitratos aumentan en su concentración con relación al fósforo se empieza a registrar un proceso de disminución de crecimiento en protozoos y algas.
- . Las algas están creciendo en la medida que el fósforo es mayor que el nitrógeno en una relación nitrógeno-fósforo entre 0,8 y 1,1.

4.5 CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LOS F.L.A. EVALUADOS

En las Tablas 4.10 y 4.11 se presentan las condiciones de operación y mantenimiento para cada unidad de F.L.A. evaluada durante la investigación. Acorde con lo que se presenta en ambas Tablas se aprecia como la duración de la limpieza de un F.L.A. esta afectada por tres variables: tiempo de vaciado del filtro, tiempo de raspado o arado (incluye nivelación de la arena) y el tiempo de llenado del filtro. En el arado del filtro no se extrae arena y el lecho filtrante no queda completamente seco en la superficie como si ocurre cuando el F.L.A. es raspado; la cantidad de arena removida durante el raspado fue típicamente 2 cms. El tiempo de vaciado y llenado depende de las condiciones de diseño hidráulico existente en las plantas y filtros piloto.

A partir de los datos de las tablas 4.10 y 4.11 se puede establecer el tiempo empleado en horas-hombre para la limpieza de cada metro cuadrado de filtro, este valor se obtiene al dividir el tiempo empleado para raspado o arado por el número de operarios y el área superficial del filtro. En la Tabla 4.12 se presentan comparativamente la fracción de tiempo con relación al

tiempo total de la operación para el vaciado, llenado y raspado o arado y el tiempo empleado para la operación en horas-hombre/m² (h-H/m²).

Tabla 4.10 Condiciones de Operación y Mantenimiento de los F.L.A. Evaluados por Raspado

TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No.	ALTURA DEL LECHO FILTRANTE (cm)		DURACION DE LA LIMPIEZA DEL MEDIO FILTRANTE (Horas)				AREA DEL FILTRO RASPADO (m ²)	No. DE OPERARIOS QUE INTERVIENEN
		Antes del Raspado	Después del Raspado	(1) Vaciado del Filtro	(2) Raspado del Filtro	(3) Llenado del Filtro	(4) Tiempo Total		
F.L.A. 1 Piloto	1	80	78	1,1	0,33	0,60	2,03	3,14	1
	2	78	76	1,0	0,25	0,50	1,75	3,14	1
F.L.A. 2 Planta Colombo Británico	1	112	110	0,53	0,67	0,57	1,80	13,6	2
F.L.A. 3 Planta Cañasgordas	1	72	69	1,23	1,0	1,67	3,90	60,4	3

- (1) Tiempo empleado para vaciar el agua sobrenadante en el filtro por el cuello de ganso hasta vaciar 10 cms debajo de la superficie del filtro.
- (2) Tiempo empleado para limpiar los primeros 2 centímetros en toda la superficie del filtro.
- (3) Tiempo empleado para llenar en forma ascendente el filtro hasta 2 cms por encima del medio filtrante.
- (4) Suma de los tiempos (1) + (2) + (3).

Tabla 4.11 Condiciones de Operación y Mantenimiento del F.L.A. 2 Piloto Evaluado por Arado

PRUEBA	ALTURA DEL LECHO FILTRANTE (cm)	TASA DE LAVADO SUPERFICIAL HORIZONTAL m ³ /m ² *h	TASA DE LAVADO ASCENDENTE m ³ /m ² *h	NIVEL DE AGUA SOBRENADANTE SOBRE EL LECHO PARA LIMPIEZA (cm)	DURACION DE LA LIMPIEZA DEL MEDIO FILTRANTE				AREA DEL FILTRO RASPADO (m ²)	No. DE OPERARIOS QUE INTERVIENEN
					(1) DESAGÜE (Seg)	(2) ARADO (Horas)	(3) LLENADO DEL FILTRO (Horas)	(4) TOTAL (Horas)		
1	80	0,50	0,47	30	23	1,78	0,42	2,2	3,14	1
2	80	0,61	0,58	30	20	1,55	0,45	2,0	3,14	1

- (1) Tiempo empleado para desocupar superficialmente el filtro después del arado. El tiempo se ha reducido considerablemente para evitar la sedimentación de partículas resuspendidas durante el arado.
- (2) Tiempo empleado para arar la superficie del lecho con un rastrillo, teniendo un nivel de agua sobrenadante de 30 cms. El tiempo incluye dos arados por limpieza.
- (3) Tiempo empleado para llenado ascendente del filtro hasta 2 cms por encima de la superficie del lecho.
- (4) Suma de los tiempos (1), (2) y (3).

Tabla 4.12 Fracción de Tiempo por cada Variable que Afecta la Limpieza y Horas-Hombres Requerida para la Operación

TIPO DE FILTRO EVALUADO	PRUEBA No.	PORCENTAJE DE TIEMPO DEL TOTAL				(1) TIEMPO REQUERIDO SOLO RASPADO O ARADO
		VACIADO	RASPADO	ARADO	LLENADO	Horas-Hombre/m ²
F.L.A. 1 Piloto (Raspado)	1	54,2	16,2	-	29,6	0,11
	2	57,1	14,3	-	28,6	0,08
F.L.A. 1 Piloto (Arado)	1	-	-	81	19	0,57
	2	-	-	77,5	22,5	0,49
F.L.A. 2 Planta Colombo Británico (Raspado)	1	29,4	37,2	-	31,4	0,10
F.L.A. 3 Planta Cañasgordas (Arado)	1	31,5	25,6	-	42,9	0,05

Nota: El tiempo requerido para la operación no incluye el lavado de arena y su transporte a la caseta de almacenamiento.

(1) Solo incluye la labor de raspado o arado

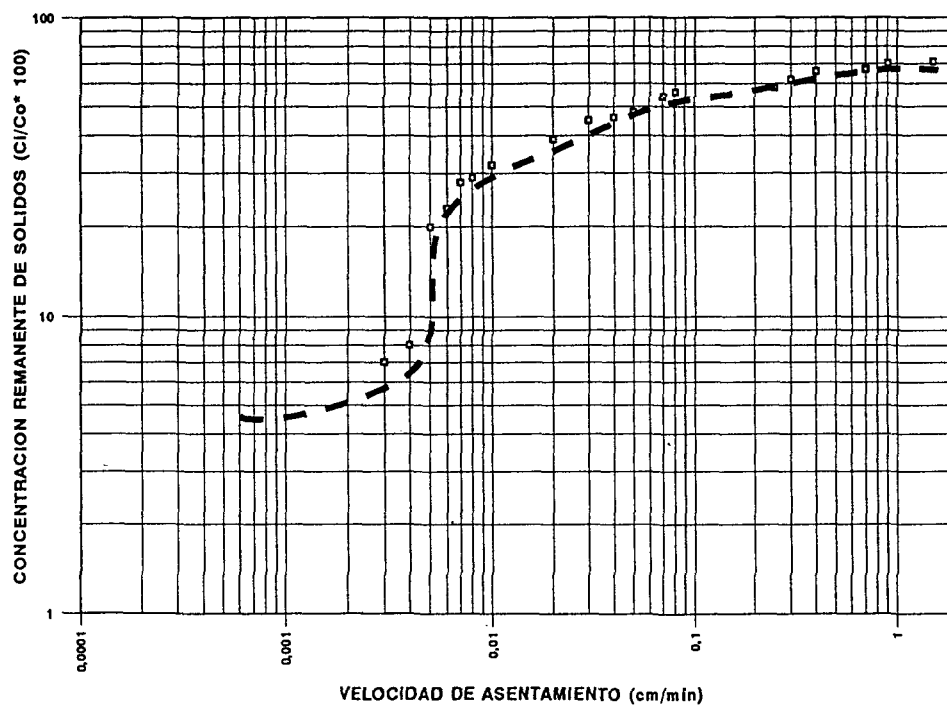


FIG 4.16 CONCENTRACION REMANENTE DE SOLIDOS CONTRA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO EN LA SUPERFICIE DEL LECHO DE UN F.L.A

Las tasas de lavado superficial horizontal y ascendente empleadas en la limpieza por arado (Tabla 4.11) se han fijado de acuerdo al tipo de material depositado en la superficie del lecho filtrante. Para conocer las características de este material se ha efectuado una prueba de sedimentación en columna al agua de lavado del raspado superficial en un F.L.A. Con base en los datos del Anexo 1.7 se ha elaborado la Figura 4.16 en la cual se ilustra el comportamiento de la concentración remanente de sólidos suspendidos en la columna y la velocidad de asentamiento (V_s) para muestras tomadas simultáneamente a diferentes alturas en la columna. El valor de la concentración remanente de sólidos es calculado como $(C_i/C_o)*100$, donde C_o es la concentración inicial de sólidos suspendidos en el tiempo $t=0$ y C_i es el valor medido de sólidos suspendidos a diferentes tiempos y profundidades. La densidad del lodo depositado en el lecho, a una temperatura de 25 °c fue de 1020 kg/m³. Acorde con la Figura 4.16 el 70% de las partículas depositadas en la superficie de un F.L.A. poseen velocidad de asentamiento menor a 1 cm/min (0.6 m/h).

5. DISCUSION

5.1 EFECTO DE LA LIMPIEZA DEL FILTRO SOBRE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO

5.1.1 Calidad del Agua Afluyente a los F.L.A.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4.1, los F.L.A piloto, operaron con valores promedios de coliformes fecales entre 1195 UFC/100 ml y 1510 UFC/100 ml y turbiedad entre 6.6 UNT y 20.2 UNT indicando estos datos el fuerte impacto de la calidad del agua cruda del río Cauca sobre las unidades de pretratamiento que antecedieron a los F.L.A. En la planta de tratamiento del Colombo Británico ingresó un afluyente con valores promedios de coliformes y turbiedad de 447 UFC/100 ml y 2 UNT respectivamente, cercanos a lo recomendado por la literatura; mientras la planta de Cañasgordas operó con valores más bajos, en coliformes fecales, en promedio 142 UFC/100 ml, la turbiedad efluente a los F.L.A. de las plantas a escala real fué muy similar (promedio 2 UNT). Los FLA piloto operaron con mayores niveles de riesgo microbiológico y físico que las plantas a escala real. Esto indica que más barreras o etapas previas de pretratamiento serían requeridas a fin de obtener niveles de turbiedad y coliformes fecales cercanos a lo recomendado por la literatura. Por ejemplo Galvis et al 1992, Dibernardo 1993 y Cleasby 1991 proponen que los límites de coliformes fecales y turbiedad para la aplicación de F.L.A. no debe superar los 500 UFC/100 ml y entre 5-10 UNT respectivamente y garantizar agua de bajo riesgo sanitario antes de la etapa final de tratamiento (Lloyd et al 1974 y Galvis et al 1992).

5.1.2 Eficiencia de Tratamiento después de la Limpieza

Con base en los datos consignados en la Tabla 4.2 se puede apreciar que la limpieza del filtro

ocasiona disminución en la remoción de turbiedad y coliformes fecales. Este hecho es acorde a lo reportado por Huisman et al (1974), Lloyd (1974), Letterman et al (1985), Bellamy et al (1985) y Collins et al (1991).

De la Tabla 4.3 se deduce que:

- i) La limpieza del filtro produce reducción en la eficiencia de remoción de coliformes fecales entre 0 y 3 unidades logarítmicas. Situación que incrementa el riesgo microbiológico si el filtro se pone en operación y el agua efluente se suministra a los consumidores sin tomar alguna medida preventiva (Regli et al 1994). Bellamy et al (1985) estableció a este respecto que la remoción de la biomembrana disminuye la remoción de coliformes fecales en 2 unidades log. Aunque la limpieza del filtro no es una deficiencia en la operación y mantenimiento, con los resultados presentados se observa que esta labor si disminuye la eficiencia de tratamiento.
- ii) Entre la turbiedad y los coliformes fecales, estos últimos parecen ser mejores indicadores del período de maduración, pues la turbiedad presenta mínima variación y los coliformes fecales evidencian el riesgo microbiológico después de la limpieza.

La Figura 4.1 y 4.2 presenta la variación de la calidad del agua afluente y efluente después de la limpieza para coliformes fecales y turbiedad después de la limpieza. De acuerdo con lo presentado la calidad del agua comienza a recuperarse gradualmente hasta alcanzar las condiciones originales de antes de la operación de limpieza, en un lapso de tiempo equivalente a lo que la literatura llama "período de maduración" (Figs 4.1 y 4.2).

En la Tabla 4.4 se presenta la duración del período de maduración para: i) Coliformes fecales con valores comprendidos entre 0 y 142 horas; para afluentes con promedios en el rango de 142

UFC/100 ml hasta 1500 UFC/100 ml; ii). Para turbiedad se registró periodos entre 17 y 160 horas, para afluentes con promedios entre 2 y 20 UNT. A este respecto Letterman et al (1985), registró periodos de maduración entre 6 horas hasta 2 semanas en plantas a escala real. Los datos de la Tabla 4.4, indican además, que en la planta de Cañasgordas no se registró periodo de maduración. Se detectó menor periodo de maduración en los F.L.A de las plantas a escala real que en los F.L.A piloto y a su vez en los f.L.A piloto el periodo de maduración fue menor en aquellos donde se empleó la técnica de limpieza por arado.

La diferencia de periodo de maduración entre los filtros piloto y los de las plantas a escala real puede ser por la variación en la calidad del agua afluente a las unidades, lo cual es una evidencia de que el periodo de maduración está afectado por esta condición, la Figura 4.3 presenta con más claridad esta situación y muestra que a mayores valores de turbiedad y coliformes fecales afluentes mayor será el periodo de maduración después de la limpieza del medio filtrante en un F.L.A.. Si un pretratamiento produce un efluente con un promedio de 500 UFC/100 ml de coliformes fecales, (de acuerdo con Galvis et al 1992 y Dibernardo) entonces un periodo de maduración de 30 horas se requieren antes de que el F.L.A. produzca un efluente con bajo riesgo sanitario; si en el efluente del pretratamiento se presentan en promedio menos de 150 UFC/100 ml de coliformes fecales el F.L.A no registrará periodo de maduración (Fig. 4.3). Valores por encima de 1000 UFC/100 ml requieren periodos de maduración mayores a 80 horas (Fig. 4.3).

Si la turbiedad promedio afluente a un F.L.A después de limpieza es de 5 UNT, el periodo de maduración es de 40 horas (Fig 4.3) y afluentes promedios en turbiedad mayores o iguales a 20 UNT ocasiona un periodo de maduración mayor a 160 horas (7 días) (Fig. 4.3). Si el prefiltro produce efluentes después de la limpieza de un F.L.A. con estas características la velocidad de prefiltración debe ser reducida y suspender la entrada de agua al F.L.A, hasta obtener turbiedades menores a 20 UNT. Este es un parámetro de control sencillo y rápido

para el seguimiento del filtro después de la limpieza.

En la Figura 4.4 se puede apreciar que entre mayor es el promedio de coliformes fecales afluentes al F.L.A., mayor será entonces la reducción en la eficiencia de remoción de coliformes fecales. Un valor promedio de 500 UFC/100 ml de coliformes fecales afluentes al F.L.A. ocasionó una reducción en la eficiencia de tratamiento en 0.7 unidades log de coliformes fecales después de la limpieza, valores promedios superiores a 600 UFC/100 ml de coliformes fecales ocasionaron reducción en la remoción de coliformes fecales mayores a una unidad logarítmica.

5.2 CONDICIONES MICROBIOLÓGICAS DEL MEDIO FILTRANTE SUPERFICIAL DESPUÉS DE LA LIMPIEZA

5.2.1 Algas y Protozoos

La limpieza del filtro afecta las poblaciones de las algas (productores primarios) y los protozoos - principales consumidores primarios - establecidos en el filtro (tabla 4.5). Lloyd (1974) establece a este respecto que la limpieza provoca disminución en la microfauna funcional en el filtro.

Los resultados de las distintas pruebas indican que la recuperación de las poblaciones de algas y protozoarios después de la limpieza presentan un patrón de "crecimiento o colonización" sigmoide o en forma de "S" (Figs 4.5 y 4.6). El modelo matemático que describe el crecimiento de estas poblaciones es similar al descrito por Krebs (1985) para poblaciones naturales y se caracteriza por:

- i) La asíntota superior tiende a ser equivalente al nivel de población existente en el filtro antes de la limpieza. Punto en el cual se puede considerar el filtro en estado "estable" o

"maduro" y la masa biológica podría estar en balance con los nutrientes disponibles (Bellamy et al 1985).

- ii) La población de organismos después de la limpieza es el intercepto con el eje y.

Las Figuras 4.5 y 4.6 pueden indicar que el patrón de recuperación de la población de algas y protozoos más que representar un patrón de crecimiento parece más bien un proceso de "colonización" que de acuerdo con Ritman y Mc Carty (1980) está controlada por cuatro procesos: crecimiento, deposición, decaimiento y separación. Parece ser que el desprendimiento puede ser el mecanismo de mayor pérdida tanto de algas como de protozoos y puede estar influenciado por tres factores; forma de hacer la limpieza, cantidad de organismos adheridos al medio filtrante antes de la limpieza y fuerzas hidrodinámicas ligadas a las tasas de filtración de operación del filtro.

Cuando la población de organismos tanto de algas como de protozoos alcanzan la asintota superior se alcanza el período de maduración para las poblaciones porque en ese instante se recuperaron los protozoos y algas hasta valores próximos a los que se tenían antes de limpieza.

La Tabla 4.7 presenta que los valores de índice finito de incremento (IFI) tanto de algas como de protozoarios para cada prueba varían entre 1.026 y 1.168 para algas, protozoos entre 1.012 y 1.072. Esta información es clave para establecer la relación existente de la población con los nutrientes disponibles. Los resultados indican que no hay una diferencia marcada de los valores IFI entre las distintas pruebas; aunque las plantas a escala real presentan un mayor valor, coincidiendo esto con menores períodos de maduración para coliformes fecales.

El hecho que no haya una diferencia marcada de los valores IFI en las distintas pruebas tiene un significado especial, pues si la población de algas y protozoos después de la limpieza fuera

similar en las pruebas, no existirían diferencias apreciables en el patrón de crecimiento de la población ni en el periodo de maduración de las poblaciones. Si existen diferencias en la población establecida después de la limpieza, existirían patrones de crecimiento poblacional diferentes.

La apreciación anterior indica que es muy importante la población base establecida en el filtro después de la limpieza y por consiguiente el periodo de maduración tiene dependencia de esta condición, y la técnica y forma como se limpie el filtro, por lo tanto, se debe mantener el mayor número posible de microorganismos después de la limpieza (Huisman et al, 1974; Lloyd, 1974 y Collins, 1991).

En la Figura 4.7 se observa una clara evidencia que el periodo de maduración depende de la población de algas y protozoos después de la operación de limpieza. A menor población de algas y protozoos mayor fue el periodo de maduración. Las algas parecen presentar menor periodo de recuperación que los protozoos y parece existir una correlación entre ambas poblaciones después de la limpieza (Fig 4.8). Lloyd (1974) estableció que en la cadena alimenticia de un F.L.A. las algas juegan un rol importante al ser los productores primarios y ser fuente de alimento de los protozoos.

5.2.2 Bacterias

Las bacterias no registraron el mismo patrón de comportamiento que las algas y protozoos. A través del tiempo se registran variaciones en su número, lo que puede indicar procesos de retraso que cambian el patrón de crecimiento estable de una población en inestable. Esto puede ser debido a: i) Depredación por los protozoos. ii) Efectos inhibidores de la densidad poblacional sobre los índices de crecimiento y/o muerte; iii) Por variaciones en el número de organismos afluentes o; iv) Factores nutricionales. Otra razón puede ser que por efectos

hidrodinámicos conjugados con el desequilibrio del lecho, las bacterias se desplacen al interior del filtro aumentando así la probabilidad de que pasen al efluente, incrementando el riesgo microbiológico (Lloyd 1974).

Las bacterias tienden a incrementarse con el tiempo después de la limpieza (fig 4.9). Sin embargo, en la planta de Cañasgordas la población de bacterias registró descenso con el tiempo (Anexo 1.5, Figura 1.5.6) y no registró período de maduración.

La Figura 4.10 muestra que entre mayor fué la población de bacterias después de la limpieza, mayor período de maduración es requerido en el F.L.A. En consecuencia: i) La eficiencia de tratamiento se afecta de manera inversa con la población de bacterias en el lecho filtrante, osea, entre menor fué la población de bacterias en el F.L.A. mayor fué la eficiencia de remoción de coliformes fecales. ii) El período de maduración tiene relación directa con la población de bacterias; es decir a mayor población de bacterias mayor período de maduración.

5.3 RELACION EXISTENTE ENTRE LA POBLACION MICROBIOLÓGICA EN EL MEDIO FILTRANTE Y LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DESPUES DE LA LIMPIEZA

Antes y después de la limpieza de un F.L.A hay predominio de la población de bacterias (entre 6 y 8 logs/cm³ arena antes y entre 4.5 y 7.5 logs/cm³ arena después), seguido de las algas (entre 4.5 y 6 logs/cm³ arena antes y entre 0 y 5.8 logs/cm³ arena después) y por último los protozoarios (entre 2.8 y 6.3 logs/cm³ arena antes y entre 0 y 5.8 logs/cm³ arena después) (Figs. 4.11 y 4.12). Sin embargo, en las plantas a escala real; en especial la del Colombo Británico se aprecia que la relación existente entre las diferentes poblaciones es casi 1:1. Después de la limpieza por raspado hay poblaciones que prácticamente se extinguen en especial los protozoos

y las algas, esto fue más significativo en el F.L.A 1 piloto prueba 1 en donde solo quedó establecida la población de bacterias. En la segunda prueba en el mismo filtro se extinguieron los protozoos y quedó población remanente de algas (3.8 logs/cm^3 arena) y bacterias (7 logs/cm^3 arena). En las pruebas piloto donde se empleó la técnica de limpieza por arado, la población de protozoos y algas sufrió menos alteraciones que en la limpieza por raspado. Collins et al (1991) a este respecto reportan que la limpieza de un filtro por arado, queda con mejores condiciones biológicas que uno por raspado.

En las plantas a escala real después de la limpieza la relación entre las poblaciones de algas, protozoos y bacterias continuo siendo 1:1, coincidiendo a su vez con menores períodos de maduración. La anterior apreciación demuestra que el período de maduración no solo es función de la calidad del agua afluente (Letterman et al, 1985); sino que además depende de la relación existente entre la población de algas, protozoos y bacterias establecidas en el filtro después de la limpieza y de la técnica o forma de hacer la limpieza del medio filtrante; similares hallazgos han reportado Lloyd 1974, Bellamy et al 1985 y Collins et al 1991.

Un factor que puede también afectar el período de maduración es la edad del medio filtrante, pues los F.L.A. piloto operaron con una condición correspondiente a la de un lecho nuevo que recién entra en operación (4 logs/cm^3 de arena en protozoos; 5 logs/cm^3 arena de algas, entre 7 y 8 logs/cm^3 arena para bacterias) y no tiene una condición microbiológica estable (Bellamy et al 1985); en tanto que las plantas a escala real operaron con lechos filtrantes con edad superior a 1 año que puede tener más equilibrio entre las poblaciones biológicas (entre 5-6 logs/cm^3 arena en protozoos; 6 logs/cm^3 arena en algas y entre 6 y 7 logs/cm^3 arena en bacterias).

La Figura 4.13 indica que a mayor población establecida de algas y protozoos, decrece la población de bacterias y mayor eficiencia de remoción de coliformes fecales se alcanzó. Para

una remoción de 0.5 logs de coliformes fecales se presentó una población de 3 logs/cm³ arena de protozoos; 4.2 logs/cm³ arena de algas y 9 logs/cm³ arena para bacterias; mientras que para la remoción de 3 logs de coliformes fecales las poblaciones fueron de 5.5 logs/cm³ arena de protozoos; 6.8 logs/cm³ arena de algas y 7.5 logs/cm³ arena para bacterias. Adicionalmente, la población de protozoarios en el medio filtrante actuó como control del crecimiento de las bacterias porque estos las depredan según lo planteado por Lloyd (1974).

Cuando la proporción de las poblaciones de algas y bacterias se equilibran alrededor de 7.3 unidades log/cm³ de arena, se alcanza una eficiencia de remoción en coliformes fecales del orden de 3 unidades log (Fig 4.13), mientras que cuando la población de bacterias y protozoos se equilibran alrededor de 6.8 logs/cm³ de arena se remueven 4.3 logs de coliformes fecales, indicando que en este punto se ha logrado una buena eficiencia del filtro y se puede sugerir este valor como indicador de la "Maduración" en un F.L.A.

5.4 NUTRIENTES

Los nitratos y los fosfatos son nutrientes esenciales en sistemas F.L.A (Lloyd 1974). Las concentraciones promedias de fosfatos en las diferentes pruebas han variado entre 210 µg/l y 560 µg/l; valores bastante elevados en comparación a lo recomendado por Mc Nair (30 µg/l) para F.L.A; este nutriente puede estar afectando el crecimiento de las algas y protozoos en las diferentes pruebas.

Para las diferentes pruebas, el IFI, Índice Finito de Incremento para algas se obtuvo a una relación nitrógeno-fósforo de 1,1 y para protozoos entre 0.8 y 1.5 (Fig 4.15), valores que estan en el mismo orden del reportado por Riegman (1995) para phaeocystis (1.5). Esta situación parece indicar que cuando se establece un equilibrio entre los dos nutrientes (fosfatos y nitratos)

se alcanza el máximo crecimiento de las algas y protozoos, guardando relación con una máxima eficiencia de remoción en coliformes fecales cuando ocurre un equilibrio entre las poblaciones. Esto puede indicar que la maduración de un F.L.A. se puede alcanzar cuando existe un equilibrio entre las poblaciones de algas, protozoos y bacterias en el orden de 7 unidades $\log./\text{cm}^3$ de arena y una relación nitrógeno-fósforo de 1:1.

La Figura 4.15, también muestra que los fosfatos está actuando como controlador del crecimiento de algas y protozoos, porque cuando su concentración es menor con relación a los nitratos la relación N/P aumenta y un proceso de decrecimiento se ha presentado (Fig 4.15). Las algas están actuando como una variable independiente que está afectada por dos factores: 1- Una relación mínima N/P a partir de la cual empiezan a crecer hasta un valor máximo (etapa de posibilidad de crecimiento) y 2- Con un incremento de la relación N/P después de la relación óptima se aprecia un proceso de decrecimiento poblacional (etapa de inhibición).

Los protozoos actúan como variable dependiente cuya tasa de crecimiento puede estar influenciada por dos factores: 1- Si las algas están en un nivel de excesos entonces la tasa de crecimiento de los protozoos no dependerá de las algas por que su tasas de crecimiento esta en un máximo y depende más de una óptima relación de N/P; 2- Si no hay un exceso de algas entonces ellas afectan el crecimiento de los protozoarios y el decrecimiento puede ser causado por un incremento de la relación N/P a partir de un valor mayor a 1.5.

5.5 OPERACION Y MANTENIMIENTO

De acuerdo con los datos de la Tabla 4.12 el tiempo requerido para la limpieza de la biomembrana en un F.L.A. por raspado representa entre el 16.2% y 37.2% del tiempo total requerido en la operación de limpieza; el resto del tiempo entre el 83.8% y 62.8% es utilizado

para el vaciado y el llenado del filtro, siendo más significativo el porcentaje de tiempo para llenado en las plantas a escala real. La variación en los valores obtenidos está condicionado por los diseños hidráulicos existentes. Adicionalmente, no obstante haberse contabilizado el tiempo de vaciado y llenado, el operador puede ejecutar otras actividades en estos períodos.

El tiempo requerido para la operación de limpieza por raspado ha variado entre 0.05 h-H/m^2 hasta 0.11 h-H/m^2 lo cual está acorde a lo reportado por Collins et al 1991. Los factores identificados que más afectan este valor son el área superficial del filtro, el número de personas que intervienen en la operación y el método de hacer la limpieza (manual o mecánica).

El arado del filtro piloto ha requerido alrededor de 0.50 h-H/m^2 , valor más alto que para un F.L.A. raspado, pero se aclara que en este tipo de limpieza factores como la extracción de arena, transporte a la cámara de lavado, lavado de la arena y transporte hasta la caseta no son necesarios puesto que en la limpieza por arado no se extrae el material filtrante y la arena se limpia en la misma unidad.

Teniendo en cuenta la evaluación exploratoria de la limpieza por arado a escala piloto con relación a la limpieza por raspado una serie de ventajas y desventajas se visualizan de manera preliminar y se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Ventajas y Desventajas entre las Técnicas de Limpieza por Arado y Raspado - Evaluación Exploratoria

VARIABLE	TECNICA DE LIMPIEZA			
	RASPADO		ARADO	
	Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
Eficiencia de tratamiento después de limpieza		Presenta periodos de recuperación en la eficiencia de coliformes fecales más largos que por arado	Presenta periodos de recuperación en la eficiencia de coliformes fecales más cortos que por arado	
Población biológica remanente en el filtro después de limpieza		La población de protozoos y algas sufren disminución	Se mantiene una buena población de bacterias, protozoos y algas	
Operación y mantenimiento	Requiere menos tiempo que para el arado	<ul style="list-style-type: none"> . La superficie del lecho filtrante debe secarse para el raspado afectando la población biológica. . La arena debe extraerse y lavarse requiriendo tiempo adicional de los operarios . Se debe dejar altura del lecho adicional para labores de raspado Es necesario construir cámaras de lavado y caseta de almacenamiento de arena 	<ul style="list-style-type: none"> La limpieza del lecho filtrante se hace en mojado sufriendo menos alteraciones la población biológica La arena se lava en el interior del filtro, ahorrando tiempo de operación Se pueden hacer filtros menos profundos por que no hay necesidad de extraer arena . No requiere la construcción de cámaras de lavado y almacenamiento de arena 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere más tiempo para la limpieza del medio filtrante y en plantas a escala real la limpieza requiere nuevos desarrollos Los filtros requieren adaptaciones especiales que puede incrementar costos de inversión.

Acorde con los resultados de la prueba de sedimentación en columna realizada al agua de lavado del raspado de un F.L.A. que se presentan en la Figura 4.16, el 70% de los sólidos depositados en la superficie del lecho que han llegado del efluente de los pretratamientos poseen velocidad de asentamiento menor a 1 cm/min (0.6 m/h) y una densidad de 1020 kg/m³ a una

temperatura de 25° C.

Con estos hallazgos, la tasa de flujo horizontal y ascensional para la operación de limpieza por arado se hizo teniendo en cuenta dos criterios: 1) La densidad del sedimento porque indica lo liviano del lodo depositado en el lecho de arena pues su densidad es parecida a la del agua (997.1 kg/m^3 a 25°C); 2) Si se emplea una tasa de lavado horizontal y ascensional del orden de $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ se garantiza que la velocidad ascensional mantenga la partícula suspendida sin fluidizar el lecho ni desprender las partículas adheridas al medio filtrante y con la velocidad horizontal garantizar el arrastre del lodo hacia el desagüe en el instante de la evacuación.

Esta situación se ve favorecida al hacerse simultáneamente, el rastrillado, la aplicación de la tasa de flujo ascendente y horizontal y la descarga inmediata del sobrenadante una vez finalizada la resuspensión. La tasa neta de lavado fue de $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y el caudal de descarga del sobrenadante de 47 l/s (Tabla 4.11). Estas tasas de lavado se pueden lograr con el caudal de operación del filtro.

6. CONCLUSIONES

6.1 EFECTO DE LA LIMPIEZA SOBRE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO

- Se evidencia la presencia de períodos de maduración para coliformes fecales entre 0 y 142 horas y para turbiedad entre 17 y 160 horas. El período de maduración tiene una relación directa con la calidad del agua afluyente a los F.L.A.
- La limpieza de un F.L.A. causa reducción en la eficiencia de remoción de coliformes fecales entre 0 y 3 unidades logarítmicas.

6.2 CONDICIONES MICROBIOLÓGICAS DEL MEDIO FILTRANTE SUPERFICIAL DESPUES DE LA LIMPIEZA

- Después de la limpieza del filtro las poblaciones de algas y protozoos presentan un patrón de crecimiento en forma de "S" que se puede representar a través del modelo logístico.
- Las poblaciones biológicas registraron los siguientes períodos de recuperación:
 - . Algas: Entre 44 y 275 horas.
 - . Protozoos: Entre 68 y 320 horas
 - . Bacterias: Entre 48 y 229 horas
- El período de maduración no solo es función de la calidad del agua afluyente; además depende de la población de organismos con que queda el filtro después de la limpieza, la técnica de limpieza y la forma como esta se lleva a cabo.

6.3 RELACION ENTRE LA POBLACION MICROBIOLOGICA EN EL FILTRO Y LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO

- Entre mayor sea la población de algas y protozoos en el medio filtrante, es menor la población de bacterias y se alcanza mayor remoción en coliformes fecales.
- Cuando la población de protozoos y bacterias se equilibran alrededor de 6.8 logs/cm^3 arena se puede lograr una reducción de 4.3 logs de coliformes fecales.

6.4 NUTRIENTES

- El índice máximo de crecimiento de algas se obtuvo a una relación Nitrógeno-Fósforo de 1.1, para protozoos entre 0.8 y 1.5; con los siguientes promedios en nutrientes.
 - . Nitratos: Entre 0.09 y 0.64 mg/l
 - . Fosfatos: Entre 0.21 y 0.56 mg/l

6.5 OPERACION Y MANTENIMIENTO

- La operación de limpieza de la biomembrana por raspado en un F.L.A. solo representa entre el 16.2% y 32.2% del tiempo total, la mayor porción de tiempo se emplea en el vaciado y llenado de la unidad.
- La limpieza por arado presenta una serie de ventajas en comparación al raspado. Con esta técnica el filtro queda en mejores condiciones biológicas y presenta menores periodos de maduración.

- La limpieza por arado a escala piloto presenta una serie de ventajas pero para definir su aplicación es necesario construir proyectos a escala real donde se evalúe la limpieza de grandes áreas.
- Limitaciones en operación y mantenimiento de filtros lentos caseros pueden ser superados con la limpieza por arado.
- Para el arado, la aplicación de la tasa de flujo ascendente y horizontal se deben hacer simultáneamente con el rastrillo y se debe garantizar la descarga inmediata del sobrenadante.

7.3 FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACION

- El establecimiento del tipo de especie en protozoarios, algas y bacterias que subsisten después de la limpieza dará elementos más precisos para establecer los factores que controlan la remoción de microorganismos en F.L.A.
- El patrón de comportamiento de las bacterias en un F.L.A. después de la limpieza podría ser analizado incorporando a las ecuaciones de crecimiento los factores de retraso.
- Por el riesgo microbiológico después de la limpieza de un F.L.A., el recuento de bacterias heterotróficas es un parámetro de control de calidad de agua que puede ser estudiado en el futuro.
- La conveniencia de cubrir F.L.A. nuevos, recién rearenados o con reciente limpieza debe ser estudiado, dado el rol que desempeñan las algas para el crecimiento de protozoos y por tanto el control de bacterias.

8. REFERENCIAS

- . Apha, AWWA, WPCF, (1989). "Standard Methods. For the Examination of Water and Wastewater". 17 Edition. Baltimore, USA.
- . A.W.W.A., (1993). "Slow Sand Filtration. An International Compilation of Recent Scientific and Operational Development. American Water Works Association. Denver. CO.
- . Bellamy, W.D., Silverman, G.P. y Hendricks, D.W. (1985). "Filtration of Giardia Cysts and Other Substances. Vol. 2. Slow Sand Filtration. EPA-600/2-85/026. Water Engineering Research Laboratory. Cincinnati, OHIO. pp 304.
- . Bishop, P., Zhang, T. y Chang, Y. F. (1995). "Effects of Biofilm Structure, Microbial Distribution and Mass Transport on Biodegradation Processes. Water Science Technology. Vol. 31. No. 1. pp 143-152. Great Britain.
- . Cullen, T.R., Letterman, R.D. (1985). "The Effect of Slow Sand Filter Maintenance on Water Quality". Journal A.W.W.A. Diciembre. Denver, USA.
- . Collins, R. M., Eighmy, T.T., Malley, J. P. (1991). "Evaluating Modifications to Slow Sand Filters". Journal A.W.W.A. Vol. 83. Septiembre. pp. 62 - 70.
- . Collins, M. R., Eighmy, T.T, Fenstermacher, J.M., Spanos, S.K., (1992). "Removing Natural Organic Matter by Conventional Slow Sand Filtration". J A.W.W.A. Mayo.
- . Dibernardo, L. (1995). "Algas e Suas. Influências na Qualidade das A'guas e nas Tecnologias de Tratamento". Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES. Río de Janeiro, Brasil. Septiembre.
- . Dibernardo, L. (1993). "Metodos e Tecnicas de Tratamento de Agua". Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES. Vol. 1 y 2. Río de Janeiro, Brasil. Septiembre.
- . Dillon, P.J., Rigler, F.I. (1974). "The phosphorus-chlorophyll Relations hip in Lakes". Limnology and Oceanography. Vol. 1, Vol. 2 y Vol. 3. Bélgica.

- . Ellis, K.V. (1987). "Slow Sand Filtration As A Technique for the Tertiary Treatment of Municipal Sewages". *Journal Water Science Technology*. Vol. 21. No. 4. pp 403-410. Gran Bretaña.
- . Ellis, K. V., Aydin, M.E. (1993). "A Study of Three Slow Sand Filters at Various Flow Rates With Constant Temperature. *Journal Water Science Technology*. Vol. 42. No. 2. pp 88-96.
- . Galvis G. (1993). Innovative Tecnology of Reduction in Biological Contaminants and THM Precursors. En: Craun G,F. ed. *Safety of Water Desinfection*. Washington DC: ILSI Press.
- . Galvis, G., Visscher, J. T., Fernández, J., and Beron, F. (1993). "Pre-treatment Alternatives for Drinking Water Supply Systems. "Occasional paper 22, IRC. The Hague.
- . Huisman, L., Wood, W. E., (1974). "Slow Sand Filtration". World Health Organization (WHO). Geneva.
- . Huisman, L. (1986). "Sedimentation and Flotation". Lecture Note, Delft, IHE.
- . IRC, CINARA (1992). "Filtración Lenta en Arena, Tratamiento de Agua para Comunidades. Planeación, Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento. Cali, Colombia.
- . Kem, J. A., Collins R. (1995). "Full-Scale Comparative Evaluation of Two Slow Sand Filter Cleaning Methods". Draft of February. Cincinaty, OHIO.
- . Krebs, CH. J. (1985). "Ecología. Estudio de la Distribución y la Abundancia". Editorial Harla, México. Segunda Edición.
- . Letterman, R.D. (1991). "Filtration Strategies to meet the Surface Water Treatment Rule". American Water Works Association. Denver, USA.
- . Lloyd, B. (1974). "The Functional Microbial Ecology of Slow Sand Filtration". PhD. Thesis. University of Sourrey, Inglad. Septiembre.
- . Logsdon, G.S. 1991. "Slow Sand Filtration". American Society of Civil Engineering. New York.

- . Madoni, P. (1981). "Manuali di Utilizzazione degli Indicatori Biologici di Qualità delle acque. I Protozoi Ciliati Degli Impranti Biologici Di Depurazione. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Roma.
- . Madoni, P. (1994). La Microfauna Nell' Analisi Di Qualita' Biologica De Fanghi Attivi. Indice Biotico del Fango: SBI. Università degli Studi di Parma.
- . Regli, Berger P, Macler B, Haas C. (1993). Proposed Decision Tree for Management of Risks in Drinking Water: Consideration for health and Socio-Economic Factor". En: Craun GF, ed. Safety of Water Desinfection, Washington, DC: ILSI Press.
- . Riegman, R. (1995). "Nutrient Related Selection Mechanisms in Marine Phytoplankton Communities and the Impact of Eutrophication on the planktonic Food Weeb". Water Science Technology. Vol. 32. No. 4. pp 63-75. Great Britain.
- . Rittman, B. (1993). "The Significance of Biofilms in Porous Media". Water Resources Research, Vol. 29. No. 7 Julio. pp. 2195-2202.
- . Salvadó, H. y Gracia, M. P. (1993). determination of Organic Loading Rate of Activated Sludge Plants Based on Protozoon Analysis". Water Science technology. Vol. 27. No. 5 pp 891-895.
- . Spencer, C.; Collins, M. 1991. "Water Quality Limitations to the Slow Sand Filters. Slow Sand Filtration Workshop.

A N E X O S

ANEXO 1 : DATOS EXPERIMENTALES

TABLA 1.1
DATOS EXPERIMENTALES PARA EL FLA 1
PILOTO RASPADO-PRUEBA 1

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (horas)	CAUDAL DE ENTRADA (L/S)	TURBIEDAD (UNT)		COLIFORMES FECALES UFC/100ML		TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	CONCEN TRACION DE NITRATOS (mg/l)	CONCEN TRACION DE FOSFATOS (mg/l)	RELACION N:P
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA				
ANTES DE RASPADO	0.13	14	2.1	1475	5	ANTES DEL RASPADO	0.5	0.02	25
0	0.13	43	11	566	121	0	0.6	0.32	1.8
4	0.13	33	12	596	148	8	0.6	0.43	1.39
8	0.13	30	17	9130	227	14	0.65	0.43	1.51
12	0.13	43	17	2220	462	20	0.80	0.30	2.67
16	0.13	37	20	2150	374	26	0.73	0.28	2.61
20	0.13	24	17	1480	280	32	0.73	0.29	2.52
24	0.13	23	15	1090	183	38	0.70	0.29	2.41
28	0.13	20	12	720	121	44	0.85	0.27	3.15
32	0.13	20	11	3040	130	50	0.83	0.26	3.19
36	0.13	17	8.5	820	94	56	0.70	0.22	3.18
40	0.13	15	8.3	720	121	62	0.55	0.18	3.06
44	0.13	13	6.5	630	64	68	1.0	0.19	5.26
48	0.13	12	5.9	1030	44	74	0.60	0.16	3.75
52	0.13	14	6.8	1250	93	80	0.20	0.23	0.87
56	0.13	12	6.5	2730	73	86	0.22	0.29	0.76
60	0.13	8.7	5.0	1400	84	92	0.23	0.20	1.15
64	0.13	13	4.1	1000	118	98	0.20	0.23	0.87
68	0.13	14	4.9	390	91	104	0.10	0.18	0.56
72	0.13	27	7.1	305	63	110	0.10	0.18	0.56
76	0.13	23	7.7	350	62	116	0.10	0.13	0.77
80	0.13	19	7.7	-	-	122	0.20	0.09	2.22
84	0.13	24	6.5	2520	87	128	0.13	0.07	1.86
88	0.13	24	8.6	1360	143	134	0.10	0.1	1
92	0.13	18	9.1	395	124	140	0.10	0.1	1
96	0.13	18	7.4	473	73	146	0.10	0.2	0.5
100	0.13	15	6	410	53	152	0.10	0.1	1
104	0.13	14	5	1260	37	158	0.05	0.15	0.13
108	0.13	12	4.2	1050	31				
112	0.13	12	3.9	990	33				
116	0.13	13	4.1	140	10				
120	0.13	11	4.5	114	4				
124	0.13	14	4.1	70	7				
128	0.13	14	3	1060	11				
132	0.13	17	2.8	425	7				
136	0.13	23	2.8	60	4				
140	0.13	32	4	720	8				
144	0.13	34	4.8	415	11				
148	0.13	25	5	302	9				
152	0.13	22	4.2	1660	6				
160	0.13	17	3.3	1550	7				
		8.5	2.3	1200	4				

TABLA 1.2
DATOS EXPERIMENTALES PARA EL FLA 1 PILOTO
RASPADO- PRUEBA 1

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	# DE ORGANISMOS cm ³ arena		RECUESTO DE BACTERIAS cm ³ de arena	BACTERIAS log/cm ³ arena
	PROTOZOOS	ALGAS	*10 ⁷	
ANTES DEL RASPADO	66250	475000	10	8
0	0	0	0.22	6.34
4.5	1250	65000	0.31	6.49
10.5	0	85000	1.70	7.23
16.5	0	88750	1.60	7.20
22.5	0	85000	-	-
28.5	5000	31250	-	-
34.5	0	13750	-	-
40.5	5000	28750	9.4	7.97
46.5	5000	30000	8.4	7.92
52.5	10000	52500	48.2	-
58.5	6250	43750	14.1	8.15
64.5	7500	47500	9.6	7.98
70.5	12500	52500	9.1	7.96
76.5	12500	53750	12.1	8.08
82.5	11250	66250	9.6	7.98
88.5	13750	72500	15.4	8.19
94.5	15000	98750	15.9	8.20
100.5	20000	125000	13.3	8.12
106.5	16250	127500	14	8.15
112.5	13750	113750	11	8.04
118.5	13750	165000	9.4	7.97
124.5	26250	176250	11.4	8.06
130.5	13750	125000	8.4	7.92
136.5	17500	166250	11.7	8.07
142.5	22500	411250	15.8	8.20
148.5	47500	420000	9	7.95
154.5	38750	431250	5.7	7.76
160.5	28750	428750	9.9	7.99

TABLA 1.3
DATOS EXPERIMENTALES PARA FLA1 PILOTO
RASPADO-PRUEBA 2

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	CAUDAL DE ENTRADA (L/S)	TURBIEDAD (UNT)		COLIFORMES FECALES UFC/100ML		CONCEN TRACION DE NITRATOS	CONCEN TRACION DE FOSFATOS	N:P
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	mg/l	mg/l	
ANTES DEL RASPADO		7.5	1	1320	2	0.13	0.332	0.39
0		-	-	-	-	0.1	0.223	0.45
6		30	1.6	1140	19	0.1	0.308	0.32
12		16	2.7	1560	5	0.1	0.212	0.47
18		11	2.5	1170	259	0.1	0.336	0.30
24		10	2.1	1840	170	0.16	0.241	0.66
30		12	1.9	2100	61	0.15	0.316	0.47
36		14	2.4	2920	75	0.14	0.486	0.29
42		12	3	1870	86	0.10	0.237	0.42
48		31	2.5	1180	65	0.08	0.241	0.33
54		38	3.6	1790	57	-	0.169	-
60		24	6	2740	60	0.13	0.125	1.04
66		25	3.5	2820	27	0.05	0.027	1.85
72		41	3.5	-	-	0.05	0.017	2.94
78		26	4.9	1090	30	0.12	0.025	4.80
84		18	4.9	1650	19	0.10	0.033	3.03
90		15	3.8	1860	21	0.07	-	-
96		13	3.4	940	15	0.08	1.262	0.06
102		16	3.5	1260	21	0.07	1.204	0.06
108		14	3.2	680	11	0.10	0.766	0.13
114		11	2.4	810	5	0.08	0.883	0.09
120		10	1.9	690	5	0.16	0.780	0.20
126		7.9	2.2	930	6	0.11	0.423	0.26
132		7.3	2.2	690	28	0.15	0.248	0.60
138		6.6	2.2	610	4	-	0.267	-
144		6.3	2.7	340	2	0.12	0.303	0.40
150		5.9	2.1	740	5	0.10	0.271	0.37
156		7.5	1.9	-	-	0.10	0.182	0.55
162		7.1	1.7	780	3	0.11	-	-

TABLA 1.4
 DATOS EXPERIMENTALES PARA FLA1 PILOTO
 RASPADO-PRUEBA 2

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	#DE ORGANISMOS cm ³ arena		RECUENTO DE BACTERIAS #/cm ³ arena *10 ⁷	BACTE RIAS log/cm ³ arena
	PROTOZOOS	ALGAS		
ANTES DEL RASPADO	21250	868750	19	8.28
0	0	36250	9.5	7.98
6	1250	43750	9.0	7.95
12	0	51250	8.3	7.22
18	0	45000	24	8.38
24	0	115000	39	8.59
30	0	125000	26	8.41
36	0	136250	25	8.40
42	1250	143750	13.6	8.13
48	2500	150000	19.5	8.29
54	2500	162500	28	8.45
60	3750	160000	19	8.28
66	5000	168750	20.7	8.32
72	7500	188750	16.3	8.21
78	6250	223750	19.6	8.29
84	13750	330000	14	8.15
90	10000	365000	13.4	8.13
96	18750	400000	14.8	8.17
102	21250	506250	13.3	8.12
108	26250	637500	14.8	8.17
114	28750	651250	1.4	-
120	31250	668750	17.7	8.25
126	-	-	13.1	8.12
132	35000	768750	12.6	8.10
138	33750	787500	17	8.23
144	31250	822500	21	8.32
150	38750	850000	34	8.53
156			3	-
162			15.1	8.18

TABLA 1.5
DATOS EXPERIMENTALES F.L.A 2 ARADO - PILOTO
PRUEBA 1

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA	CAUDAL DE ENTRADA (l/s)	TURBIEDAD (UNT)		COLIFORMES FECALES UFC/100 ML		TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	CONCEN TRACION DE NITRATOS (mg/l)	CONCEN TRACION DE FOSFATOS (mg/l)	N:P
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA				
antes del arado		37	2.2	2470	2	antes del arado	0.28	0.097	2.9
0		28	2.5	4020	2128	0	0.06	0.013	4.3
4		40	85	3420	141	3	0.08	0.013	6.2
8		41	17	3350	106	9	0.12	0.013	9.2
12		29	18	3300	141	15	0.10	0.095	1.1
16		34	14	980	89	21	0.10	0.095	1.1
20		33	14	1570	99	27	0.07	0.110	0.64
24		25	13	1070	57	33	0.06	0.127	0.47
28		22	12	2170	31	39	0.08	0.052	1.5
32		21	11	2560	63	45	0.04	0.042	0.95
36		18	10	800	71	51	0.07	0.053	1.32
40		17	8.1	580	79	57	0.15	0.024	6.25
44		16	7	870	61	63	0.13	0.028	4.6
48		16	6.8	890	31	69	0.11	0.032	3.4
52		13	5.1	2030	22	75	0.08	0.087	0.9
56		12	4.3	1410	30	81	0.21	0.089	2.4
60		12	4.3	1010	12	87	0.08	0.037	2.2
64		13	4.9	335	18	93	0.04	0.017	2.4
68		17	4.9	1390	57	99	0.11	0.225	0.5
72		18	4.5	405	32	105	0.10	0.140	0.6
76		19	4	272	32	111	0.07	0.018	3.9
80		17	3.7	1490	25	117	0.05	0.018	2.8
84		16	3.7	1950	14	123	0.10	0.154	0.65
88		14	3.6	1250	22				
92		13	4	1180	19				
96		12	3.4	1600	23				
100		10	2.7	2520	8				
104		8.2	2.5	1655	13				
108		8.4	2.6	1280	9				
112		8.6	3.3	1070	16				
116		7.7	2.7	340	2				
120		7.8	2.8	275	1				
124		7.5	2.3	730	3				
128		7.1	2	1020	4				
132		6.9	2	435	2				
136		-	-	3640	8				

TABLA 1.6
DATOS EXPERIMENTALES F.L.A 2 PILOTO
ARADO - PRUEBA 1

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	# DE ORGANISMOS /cm ³ arena		RECuento DE BACTERIAS #/ cm ³ arena	UNIDADES LOG BACTERIAS / cm ³ arena
	PROTOZOOS	ALGAS	*10 ⁷	
antes del arado	31250	1'497500	35.2	8.50
0	3750	441250	3.7	7.57
3	15000	787500	3.7	7.57
9	13750	872500	5.2	7.72
15	13750	900000	6.4	7.81
21	25000	930000	7.6	7.88
27	21250	963750	6.7	7.83
33	17500	953750	6.1	7.78
39	20000	1'012500	9.2	7.96
45	12500	1068750	13.1	8.12
51	21250	1'052500	6.5	7.81
57	17500	1'195000	14.4	8.16
63	22500	1'217500	7.7	7.89
69	15000	1'225000	11.4	8.06
75	21250	1'256250	9	7.95
81	20000	1'375000	8.3	7.92
87	23750	1'368750	12	8.08
93	27500	1'387500	9.6	7.98
99	30000	1'402500	11.8	8.07
105	26250	1'400000	9.9	7.99
111	30000	1'418750	12.6	8.10
117	20000	1'423750	11	8.04
123	31250	1'462500	14.3	8.16

TABLA 1.7
DATOS EXPERIMENTALES F.L.A 2 ARADO - PILOTO
PRUEBA 2

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA	CAUDAL DE ENTRADA (l/s)	TURBIEDAD (UNT)		COLIFORMES FECALES UFC/100 ML		CONCEN TRACION DE FOSFATOS (mg/l)	CONCEN TRACION DE NITRATOS (mg/l)	N:P
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA			
antes del arado	0.13	11	1.7	3755	1	0.843	0.19	4.43
0	0.13	9.1	1.6	3410	35	0.473	0.19	2.49
6	0.13	7.9	2.4	3230	132	1.151	0.11	10.46
12	0.13	6.9	2.5	2470	19	0.928	0.17	5.46
18	0.13	6.2	1.7	1740	24	0.104	0.19	0.55
24	0.13	6.2	1.6	600	7	0.107	0.16	0.67
30	0.13	7.2	2.4	1090	8	0.147	0.20	0.74
36	0.13	7.0	2.2	970	4	0.112	0.20	0.56
42	0.3	-	-	-	-	-	-	-
48	0.13	7.4	2.2	380	4	0.104	0.19	0.55
54	0.13	7.3	2.4	1040	3	0.144	0.20	0.72
60	0.13	6.4	2.2	1.710	2	0.126	0.12	1.05
66	0.13	6.2	2.1	300	3	0.125	0.20	0.63
72	0.13	5.3	1.8	270	2	0.147	0.10	1.47
78	0.13	5.2	2	390	2	0.108	0.10	1.08
84	0.13	4	2	610	2	0.124	0.10	1.24
90	0.13	-	-	700	0	-	-	-

TABLA 1.8
DATOS EXPERIMENTALES F.L.A 2 PILOTO
ARADO - PRUEBA 2

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	# DE ORGANISMOS /cm ³ arena		RECUESTO DE BACTERIAS #/ cm ³ arena	UNIDADES LOG BACTERIAS / cm ³ arena
	PROTOZOOS	ALGAS	*10 ⁷	
antes del arado	91250	2'140000	121.2	9.1
0	60000	732500	29.5	8.47
4	82500	1'040000	26.2	8.42
10	85000	1'143750	79.7	8.90
16	78750	1'187500	77.2	8.89
22	72500	1'001250	123.7	9.09
28	118750	1'387500	21.2	8.33
34	43750	1'411250	16.7	8.22
40	75000	1'440000	60	8.78
46	-	-	-	-
52	78750	1'500000	10.4	8.02
58	-	-	50	8.70
64	86250	1'255000	46.7	8.67
70	77500	1'512500	44.2	8.64
76	86250	1'521250	79.7	8.90
82	92500	1'543750	204	-
88	142500	1'575000	80	8.90
94				
100				

TABLA 1.9
DATOS EXPERIMENTALES F.L.A 2
PLANTA COLOMBO BRITANICO

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	CAUDAL DE ENTRADA (l/s)	TURBIEDAD (UNT)		COLIFORMES FECALES UFC/100 ML		TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	CONCEN TRACION DE NITRATOS (mg/l) en el medio filtrante	CONCEN TRACION DE FOSFATOS (mg/l) en el medio filtrante	N:P
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA				
antes del raspado	0.40	1.5	0.7	420	0	antes de limpieza	1.02	0.90	1.13
0	0.40	2.7	2.0	690	9	0	0.21	0.75	0.28
4	0.40	1.1	0.7	210	0	6	-	-	-
6	0.40	1.2	0.8	130	0	12	0.48	0.50	0.96
9	0.40	1.2	0.6	140	1	26	0.58	0.70	0.83
15	0.40	2.8	1.2	200	0	32	3.90	-	-
17	0.40	1.0	0.6	-	-	38	0.80	0.50	1.60
23	0.40	3.8	1.8	900	3	44	0.34	0.20	1.70
25	0.40	1.8	1.2	880	4	-	-	-	-
27	0.40	2.5	1.2	700	4	-	-	-	-
30	0.40	2.0	1.2	340	5	-	-	-	-
33	0.40	2.0	1.4	530	22	-	-	-	-
39	0.40	2.4	1.0	200	3	-	-	-	-

TABLA 1.10
DATOS EXPERIMENTALES F.L.A 2
PLANTA COLOMBO BRITANICO

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	# DE ORGANISMOS /cm ³ arena		RECUESTO DE BACTERIAS #/ cm ³ arena	UNIDADES LOG BACTERIAS / cm ³ arena
	*10 ⁶ PROTOZOOS	*10 ⁶ ALGAS	*10 ⁷	
antes del raspado	19.4	20.80	2.10	7.32
0	3.02	4.40	0.54	6.73
6	6.40	15.20	0.73	6.86
12	8.10	17.60	0.60	6.78
18	9.50	19.80	0.90	6.95
26	10.0	31.10	2.40	7.38
32	17.50	27.50	1.30	7.11
38	28.10	40.80	1.18	7.07
44	14.40	31.90	-	-

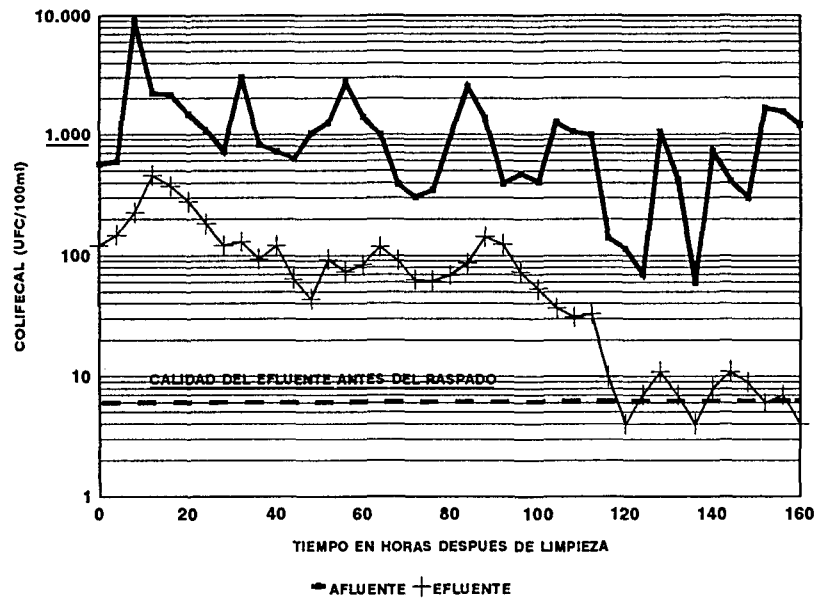
TABLA 1.11
DATOS EXPERIMENTALES FLA 3
PLANTA DE CAÑASGORDAS

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA	CAUDAL DE ENTRADA (L/S)	TURBIEDAD (UNT)		COLIFORMES FECALES UFC/100ML		TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	CONCEN TRA CION DE NITRA TOS (mg/l)	CONCEN TRACION DE FOSFA TOS (mg/l)	N:P
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA				
ANTES DE RASPADO	1.92	2.5	0.55	13	0	ANTES DEL RASPADO	0.18	0.069	2.61
0	1.92	2.1	0.38	5	1	0	0.10	0.035	2.86
2	1.92	1.8	0.30	33	1	4.5	0.12	0.0233	5.15
6	1.92	1.6	0.95	251	1	10.5	0.13	0.253	0.51
8	1.92	1.6	0.78	207	2	21.0	0.083	0.187	0.443
10	1.92	2.1	0.78	9	0	26.0	0.108	0.183	0.59
15.5	1.92	2.6	0.65	-	-	28.5	0.06	0.380	0.16
17.5	1.92	2.9	0.60	-	-	34.5	0.13	0.195	0.67
19.5	1.92	3	0.71	7	1				
21.5	1.92	2.2	0.90	-	-				
23.5	1.92	1.9	0.73	330	1				
26	1.92	1.8	0.61						
30	1.92	1.4	0.53	293	1				

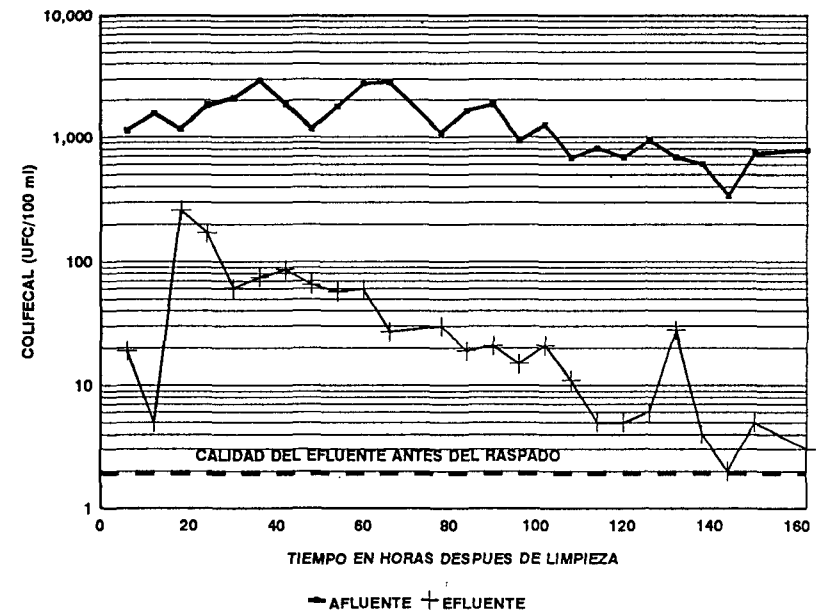
TABLA 1.12
DATOS EXPERIMENTALES FLA3
PLANTA DE CAÑASGORDAS

TIEMPO DESPUES DE LIMPIEZA (HORAS)	# DE ORGANISMOS CM3 ARENA		RECUENTO DE BACTERIAS #cm3 de arena *10 ⁷	BACTERIAS UNIDADES LOG/cm ³ arena
	PROTOZOOS *10 ⁶	ALGAS *10 ⁶		
ANTES DEL RASPADO	1.32	4.06	20.6	8.31
0	0.16	1.19	3.90	7.59
4.5	0.37	2.19	2.70	7.43
10.5	0.36	3.20	4.90	7.69
14.0	0.72	3.40		
18.5	0.53	2.30		
21			1.70	7.23
24.5	0.55	3.60		
26			0.60	6.78
28.50			1.50	7.18
34.50			3.30	7.52

**ANEXO 1.1
COMPORTAMIENTO DE COLIFORMES FECALES Y TURBIEDAD
DESPUES DE LA LIMPIEZA EN F.L.A PILOTO Y ESCALA REAL**



**FIG 1.1.1 COLIFORMES FECALES DESPUES DE RASPADO.
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA1**



**FIG 1.1.2 COLIFORMES FECALES DESPUES DE RASPADO.
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA 2**

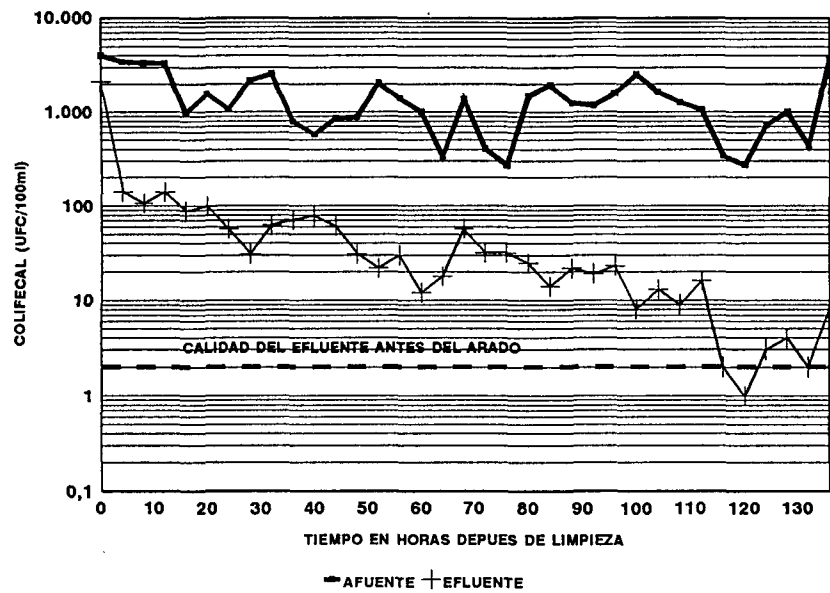


FIG 1.1.3 COLIFORMES FECALES DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO PRUBA1

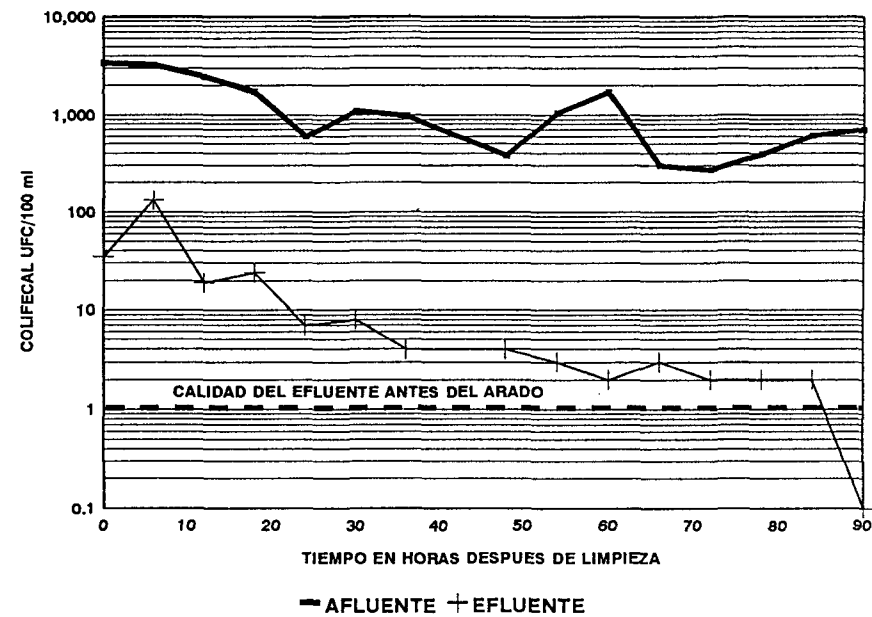
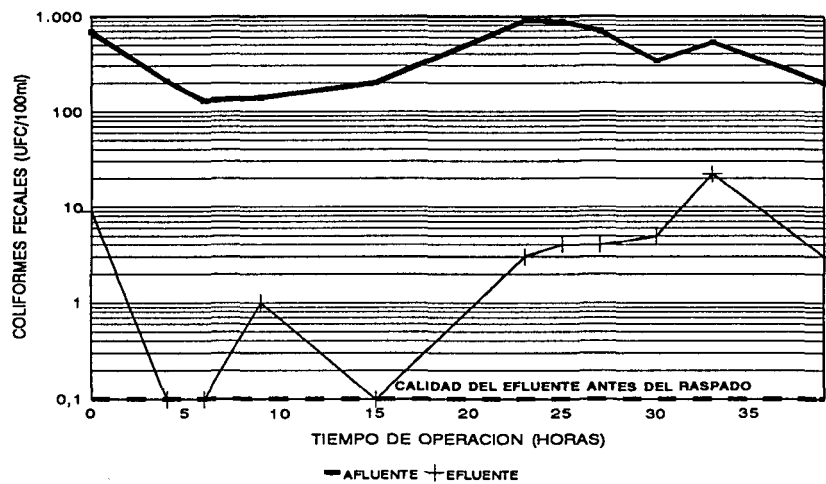
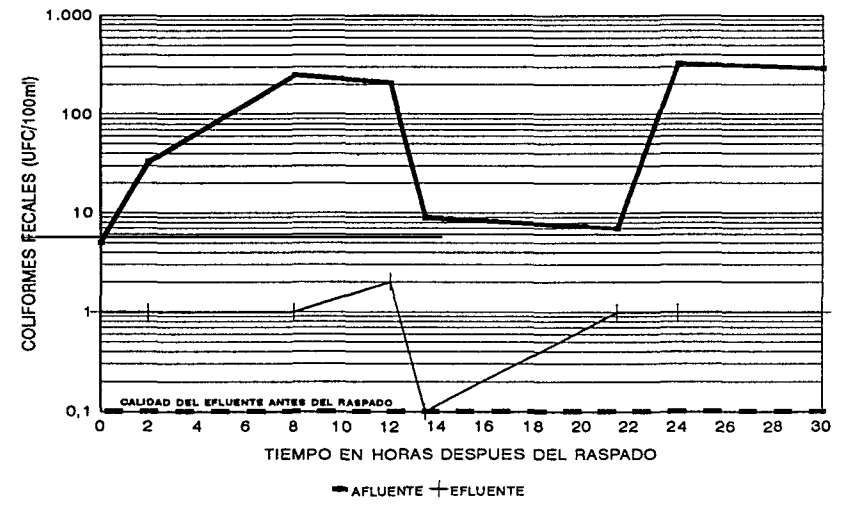


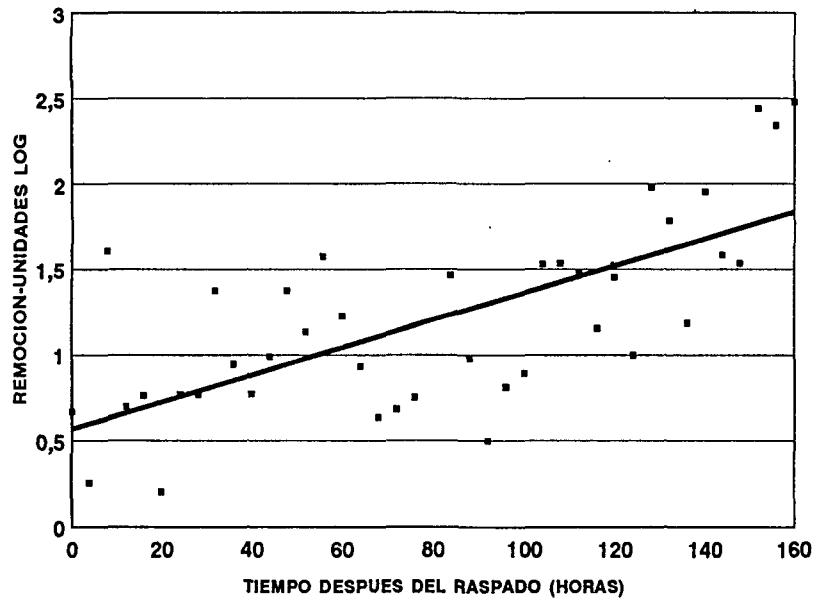
FIG 1.1.4 COLIFORMES FECALES DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO PRUEBA 2



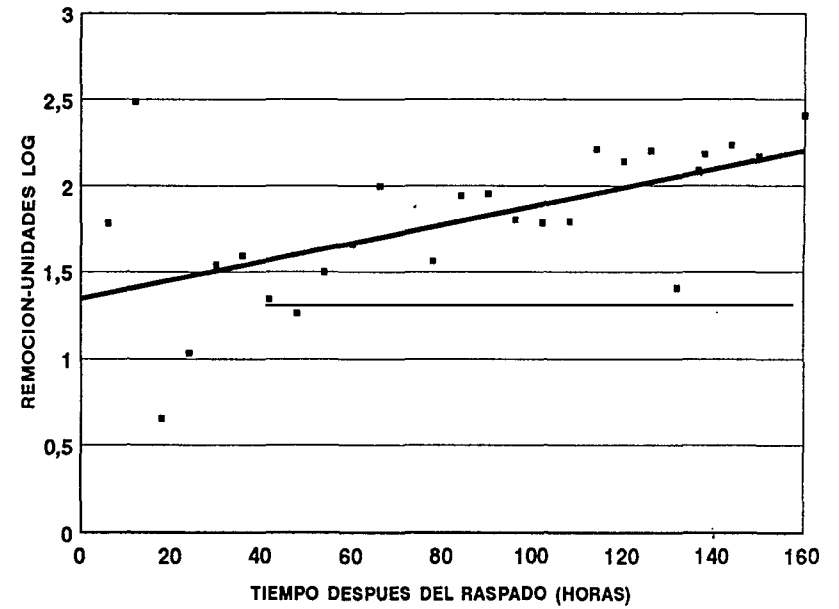
**FIG 1.1.5 COLIFORMES FECALES DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 2 PLANTA COLOMBO BRITANICO**



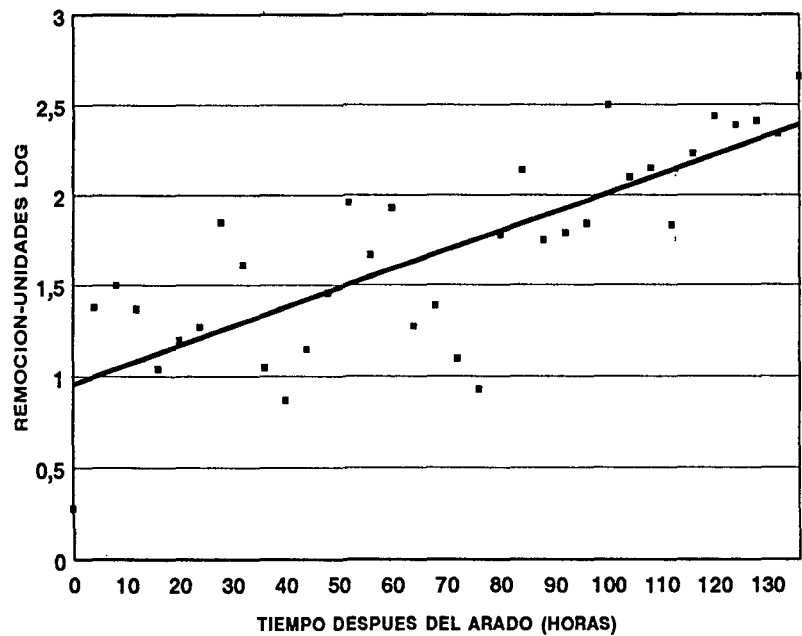
**FIG 1.1.6 COLIFORMES FECALES DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 3 PLANTA CAÑASGORDAS**



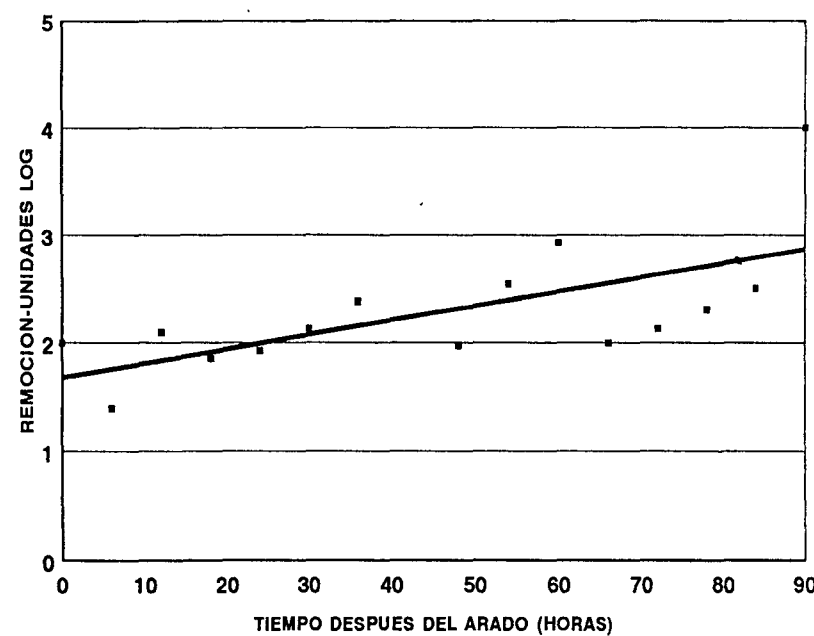
REMOCION DE COLIFORMES FECALES DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO PRUEBA 1



REMOCION DE COLIFORMES FECALES DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO PRUEBA 2



REMOCION DE COLIFORMES FECALES DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO PRUEBA 1



REMOCION DE COLIFORMES FECALES DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO PRUEBA 2

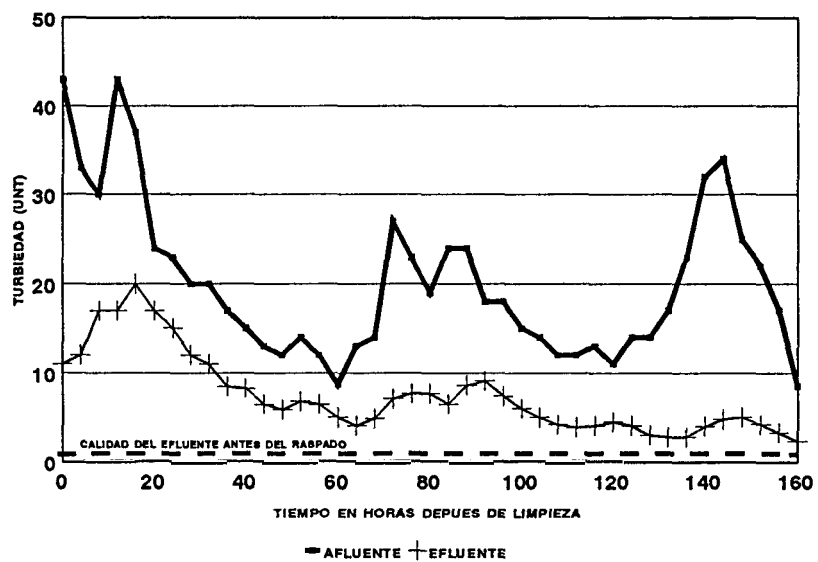


FIG 1.1.7 TURBIEDAD DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO PRUEBA 1

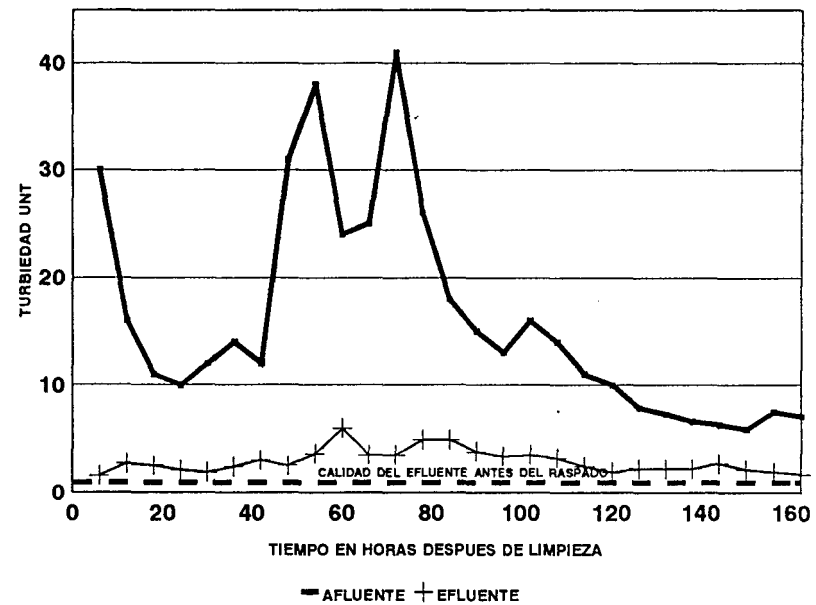


FIG 1.1.8 TURBIEDAD DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO PRUEBA 2

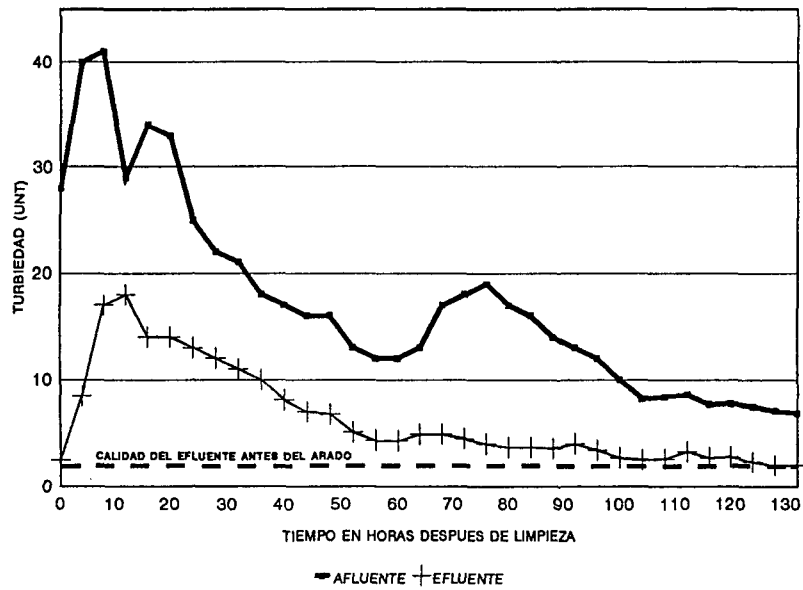


FIG 1.1.9 TURBIEDAD DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO-PRUEBA 1

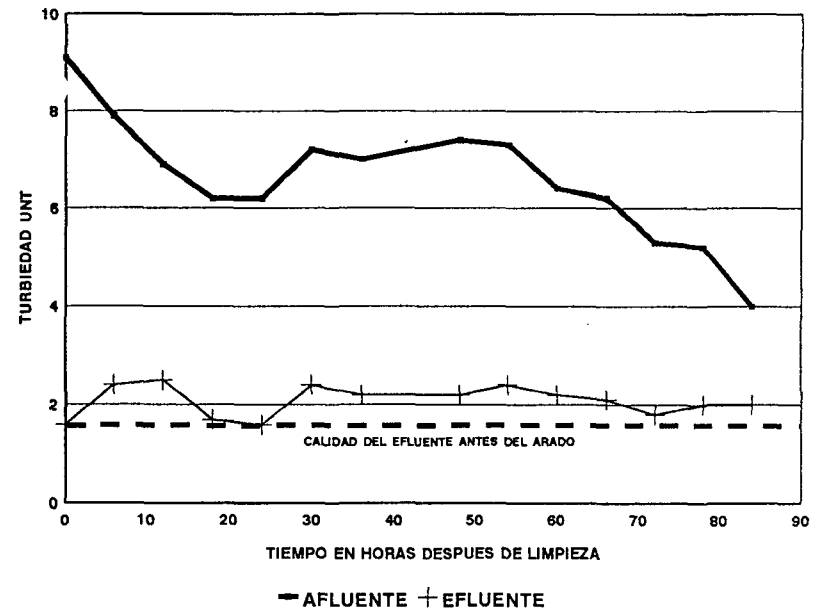
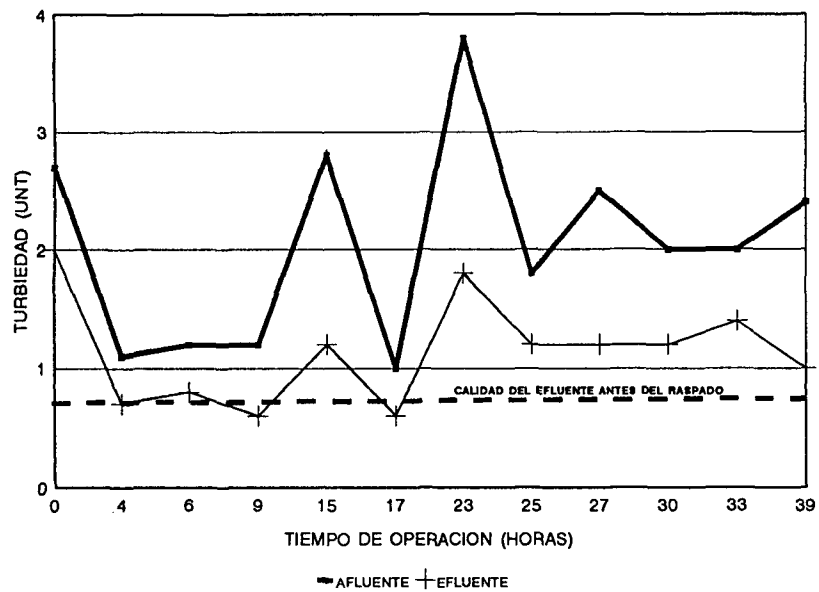
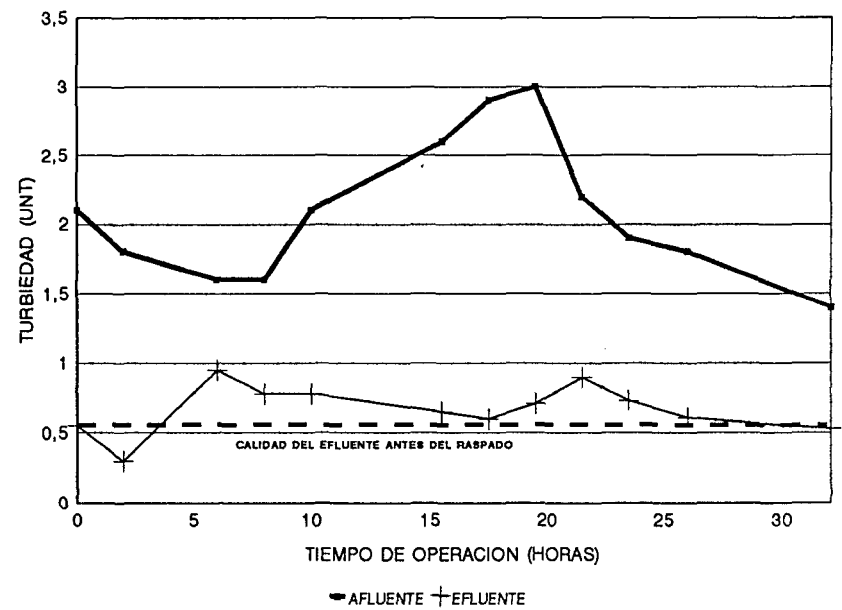


FIG 1.1.10 TURBIEDAD DESPUES DE ARADO
F.L.A 2 PILOTO-PRUEBA2



**FIG 1.1.11 TURBIEDAD DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 2 PLANTA COLOMBO BRITANICO**



**FIG 1.1.12 TURBIEDAD DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 3 PLANTA CAÑASGORDAS**

**ANEXO 1.2
COMPORTAMIENTO DE LA POBLACION DE ALGAS Y PROTOZOARIOS
DESPUES DE LA LIMPIEZA DE UN F.L.A**

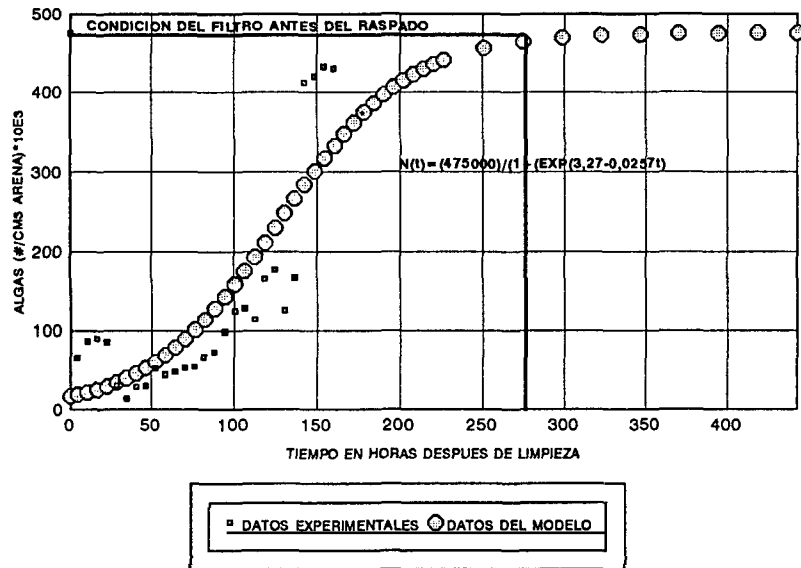


FIG 1.2.1 COMPORTAMIENTO DE LAS ALGAS DESPUES DE LIMPIEZA POR RASPADO
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA1

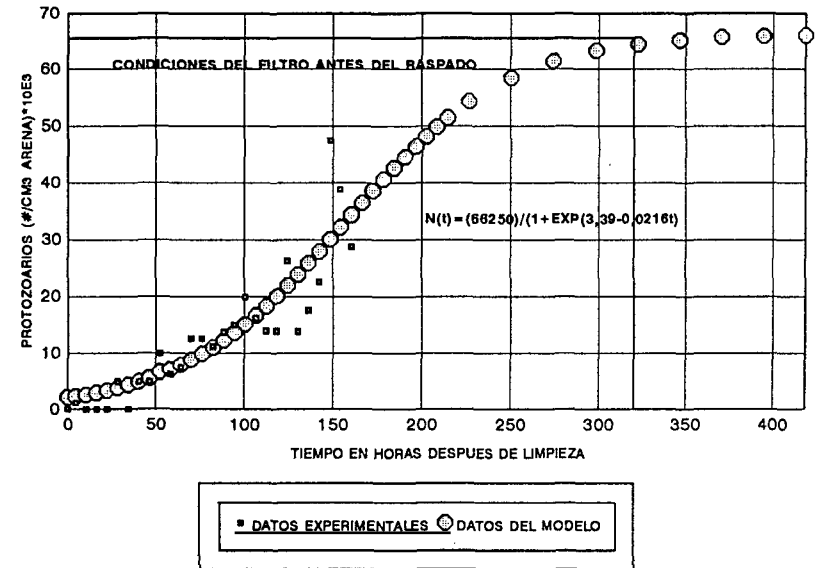


FIG 1.2.2 COMPORTAMIENTO DE PROTOZOARIOS DESPUES DE LIMPIEZA POR RASPADO
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA1

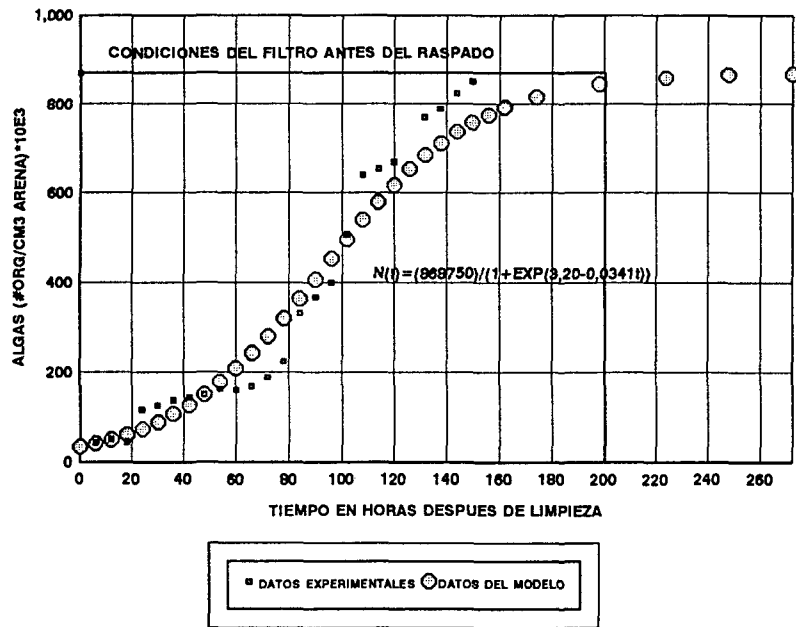


FIG 1.2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS ALGAS DESPUES DE LIMPIEZA POR RASPADO
F.L.A 1 PILOTO PRUEBA2

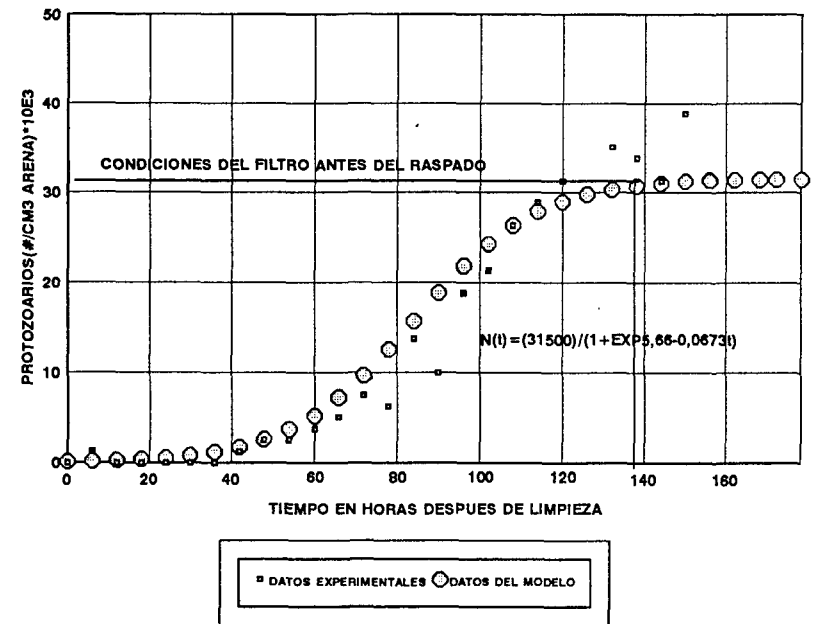


FIG 1.2.4 COMPORTAMIENTO DE LOS PROTOZOARIOS DESPUES DE LIMPIEZA POR RASPADO
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA2

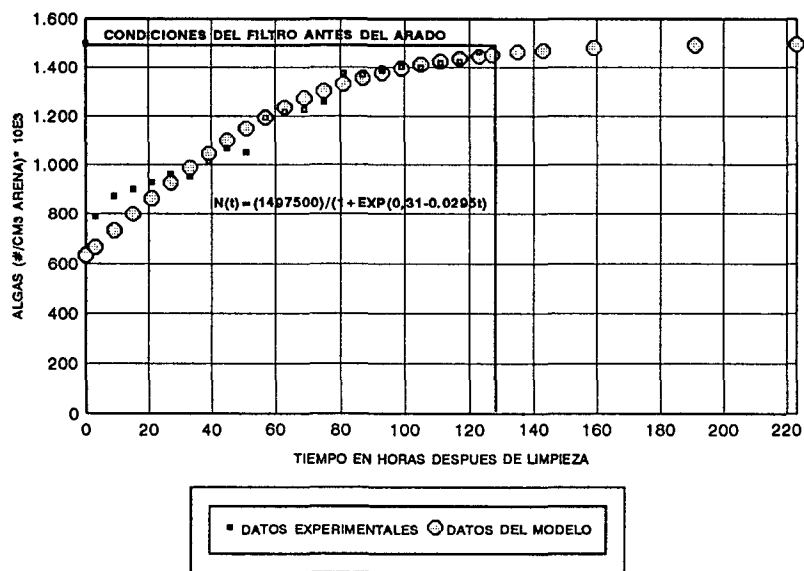


FIG 1.2.5 COMPORTAMIENTO DE LA POBLACION DE ALGAS DESPUES DE LIMPIEZA POR ARADO F.L.A 2 PILOTO-PRUEBA1.

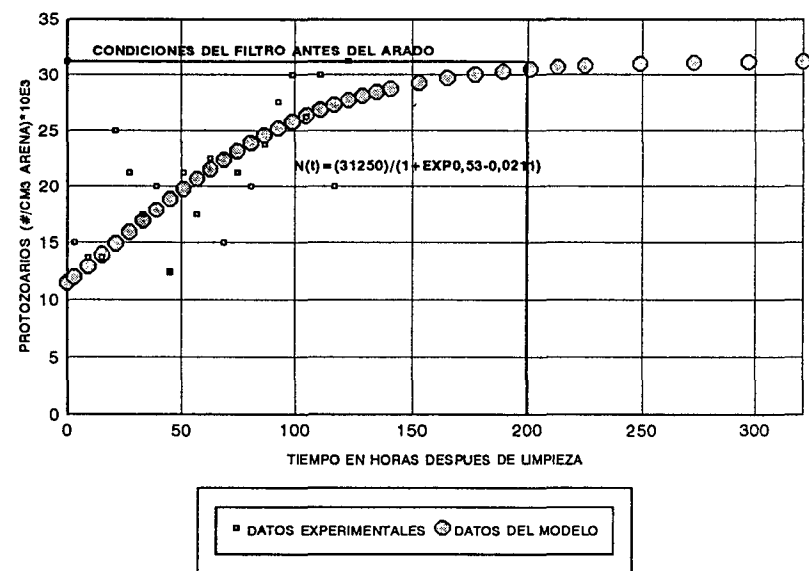


FIG 1.2.6 COMPORTAMIENTO DE LA POBLACION DE PROTOZOARIOS DESPUES DE LIMPIEZA POR ARADO F.L.A 2 PILOTO PRUEBA1.

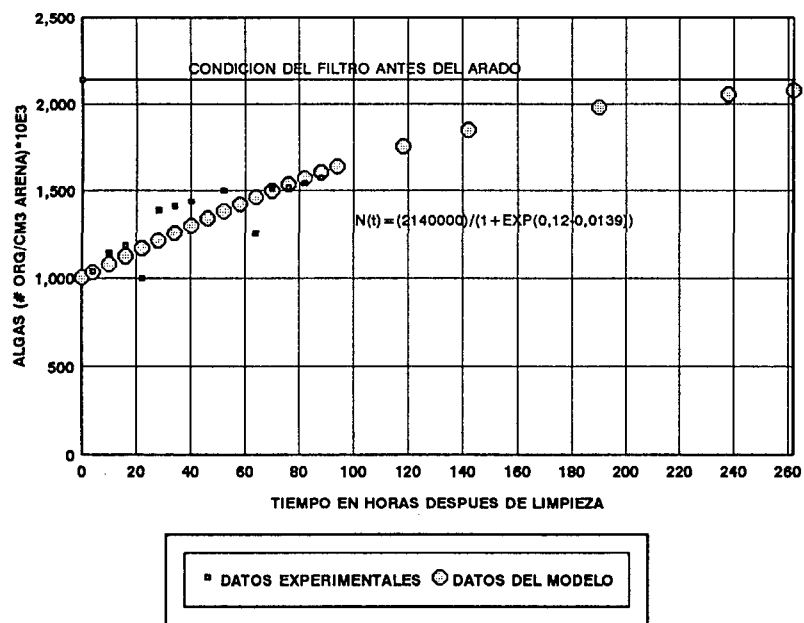


FIG 1.2.7 COMPORTAMIENTO DE LAS ALGAS DESPUES DE LIMPIEZA POR ARADO F.L.A 2 PILOTO PRUEBA 2

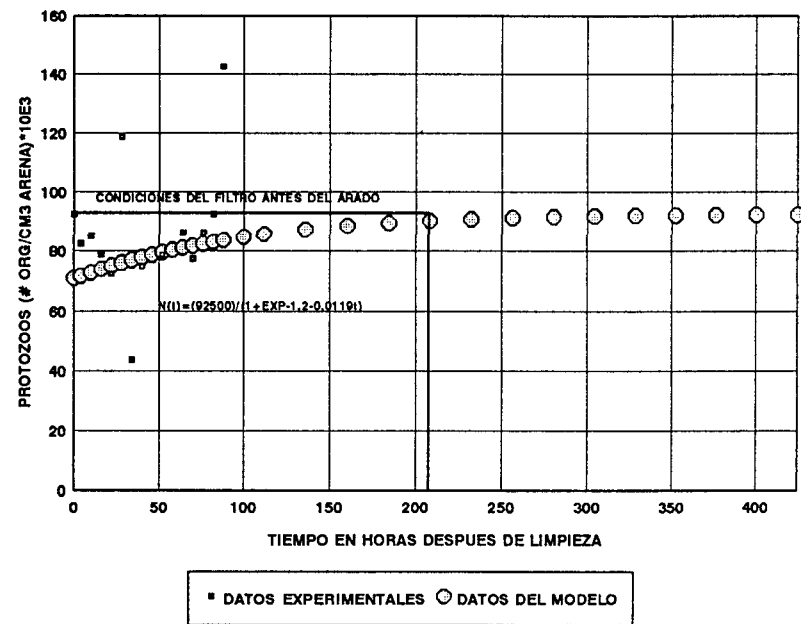


FIG 1.2.8 COMPORTAMIENTO DE LOS PROTOZOARIOS DESPUES DE LA LIMPIEZA POR ARADO F.L.A 2 PILOTO PRUEBA2

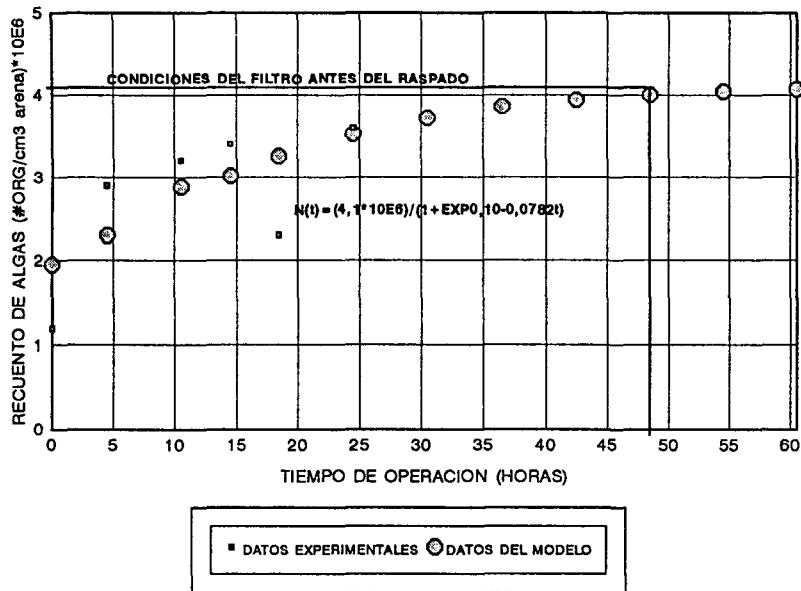


FIG 1.2.11 RECUESTO DE ALGAS DESPUES DEL RASPADO F.L.A 3 PLANTA CAÑASGORDAS

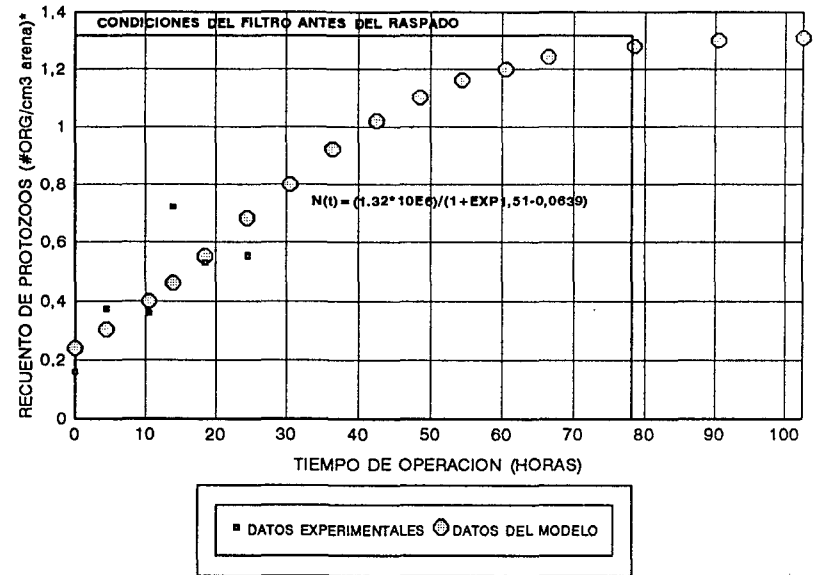


FIG 1.2.12 PROTOZOOS DESPUES DEL RASPADO F.L.A 3 PLANTA CAÑASGORDAS

ANEXO 1.3

CALCULOS DE LOS PARÁMETROS a y r EN LA MODELACIÓN DE ALGAS Y PROTOZOARIOS DESPUES DE LA LIMPIEZA DE UN F.L.A

EL modelo de recuperaci3n de las algas y protozoarios despues de la limpeza de un FLA tiene la tendencia del modelo logístico.

La forma integral de la ecuaci3n logística se puede expresar como sigue:

$$N(t) = \frac{K}{1 + e^{a-rt}} \quad (1) \text{ donde: } N_{(t)} = \text{Tama\~no de la poblaci3n en el tiempo } T$$

e = Base de los logaritmos naturales (2,71828)

a = Constante de integraci3n que define la posici3n de la curva respecto al origen.

r = Indice de crecimiento de la poblaci3n por individuo

K = Asintota superior o valor m3ximo de N

m = Tiempo

Es posible reorganizar o expresar la ecuaci3n logística de otra forma por reordenamiento de t3rminos

$$N_t + N_t e^{a-rt} = K$$

$$N_t e^{a-rt} = K - N_{(t)}$$

$$\ln(N_t e^{a-rt}) = \ln(K - N_t)$$

$$a-rt = \ln \frac{(K - N_{(t)})}{N_{(t)}}$$

Esta es la ecuaci3n de una recta en la que:
Las coordenadas son:

$$Y = \text{Ln } \frac{(K-N)}{N}$$

= Tiempo

La pendiente de la recta es r. Es posible entonces emplear esta relación para ajustar los datos de una ecuación logística a datos biológicos reales.

Por lo tanto se puede obtener una estimación aproximada de los parámetros a y r de la curva logística a partir de la ecuación (2) en la forma siguiente:

Se estima la densidad asintótica (K) a partir de las medidas de los parámetros para cada evaluación. Una vez que se haya estimado K es posible calcular el término $(K-N/N)$ para cada dato en el tiempo.

Los cálculos de los parámetros para cada evaluación se presentan a continuación:

1. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS PARA ALGAS:
 PRUEBA 1 - RASPADO : K = 475000

TIEMPO (HORAS)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	0	17392	-
4.5	65000	19437	1.842
10.5	85000	22524	1.523
16.5	88750	26073	1.471
22.5	85000	30144	1.523
28.5	31250	34802	2.653
34.5	13750	40114	3.512
40.5	28750	46152	2.742
46.5	30000	52989	2.697
52.5	52500	60694	2.085
58.5	43750	69336	2.288
64.5	47500	78974	2.197
70.5	52500	89656	2.085
76.5	53750	101413	2.059
82.5	66250	114254	1.819
88.5	72500	128163	1.714
94.5	98750	143094	1.337
100.5	125000	158967	1.029
106.5	127500	175669	1.003
112.5	113750	193053	1.155
118.5	165000	210946	0.630
124.5	176250	229149	0.527
130.5	125000	247451	1.029
136.5	166250	265636	0.619
142.5	411250	283491	-1.864
148.5	420000	300823	-2.032
154.5	431250	317451	-2.288
160.5	428750	333252	-2.226
166.5		348096	
172.5		361913	
178.5		374659	
184.5		386321	
190.5		396910	
196.5		406458	
202.5		415016	
208.5		422643	
214.5		429406	
220.5		435379	
226.5		440630	
250.5		455813	
274.5		464449	
298.5		469247	
322.5		471877	
346.5		473310	
370.5		474086	
384.5		474506	
418.5		474733	
442.5		474856	

$R^2 = 0.62$
 $a = 3.27$
 $r = -0.02566$

2. PRUEBA - RASPADO: k = 868750 (ALGAS)

TIEMPO (HORAS)	N (obs)	N (model)	Ln (K-N/N)
0	36250	34025	3.134
6	43750	41382	2.937
12	51250	50234	2.769
18	45000	60840	2.907
24	115000	73484	1.880
30	125000	88469	1.783
36	136250	106101	1.682
42	143750	126678	1.618
48	150000	150457	1.566
54	162500	177631	1.469
60	160000	208290	1.428
66	168750	242386	1.423
72	188750	279698	1.282
78	223750	319822	1.059
84	330000	362163	0.490
90	365000	405964	0.322
96	400000	450352	0.159
102	506250	494409	-0.334
108	637500	537242	-1.014
114	651250	578056	-1.096
120	668750	616206	-1.207
126	-	651234	-
132	768750	682869	-2.039
138	787500	711018	-2.271
144	822500	735734	-2.872
150	850000	757184	-3.814
156	-	815729	-
162	-	844534	-
174	-	858605	-
198	-	864245	-
224	-	866757	-
248	-	775614	-
272	-	791310	-

$R^2 = 0.94$
 $a = 3.20$
 $r = -0.0341$

3. ARADO PRUEBA 1: k = 1'497500 (ALGAS)

TIEMPO (HORAS)	N (obs)	N (model)	Ln (K-N/N)
0	441250	633614	0.873
3	787500	666163	-0.104
9	872500	732093	-0.333
15	900000	798282	-0.409
21	930000	863702	-0.494
27	963750	927374	-0.591
33	953750	988419	-0.562
39	1'012500	1'046109	-0.736
45	1'068750	1'099892	-0.913
51	1'052500	1'149398	-0.861
57	1'195000	1'194439	-1.374
63	1'217500	1'234983	-1.469
69	1'225000	1'271131	-1.503
75	1'256250	1'303085	-1.650
81	1'375000	1'331119	-2.418
87	1'368750	1'355551	-2.364
93	1'387500	1'376721	-2.534
99	1'402500	1'394972	-2.692
105	1'400000	1'410639	-2.664
111	1'418750	1'424039	-2.891
117	1'423750	1'435462	-2.960
123	1'462500	1'445174	-3.732
127	-	1'450816	-
135	-	1'460387	-
143	-	1'468035	-
159	-	1'478984	-
191	-	1'490241	-
223	-	1'494667	-

$R^2 = 0.95$
 $a = 0.31$
 $r = -0.0295$

4. ARADO PRUEBA 2 (ALGAS) $k = 2'140000$

TIEMPO (HORAS)	N (obs)	N (model)	Ln (K-N/N)
0	732500	1'005877	0.653
4	1'040000	1'035557	0.056
10	1'143750	1'080165	-0.138
16	1'187500	1'124736	-0.220
22	1'001250	1'169117	0.128
28	1'387500	1'213158	-0.612
34	1'411250	1'256710	-0.661
40	1'440000	1'299633	-0.721
46	-	1'341795	-
52	1'500000	1'383074	-0.852
58	-	1'423358	-
64	1'255000	1'462549	-0.349
70	1'512500	1'500559	-0.879
76	1'521250	1'537315	-0.899
82	1'543750	1'572757	-0.951
88	1'575000	1'606838	-1.025
94	-	1'639523	-
118	-	1'756015	-
142	-	1'850185	-
190	-	1'980785	-
238	-	2'055229	-
262	-	2'078585	-

$$R^2 = 0.705$$

$$a = 0.1196$$

$$r = -0.01389$$

5. RASPADO PLANTA COLOMBO BRITANICO (ALGAS)

$$k = 32 \times 10^6$$

TIEMPO (HORAS)	N (obs)	N (model)	Ln (K-N/N)
0	4.4×10^6	5.2×10^6	1.836
6	15.2×10^6	10.5×10^6	0.100
12	17.6×10^6	17.8×10^6	-0.201
18	19.8×10^6	24.3×10^6	-0.484
26	31.1×10^6	29.3×10^6	-3.542
32	27.5×10^6	30.9×10^6	-1.810
44	31.9×10^6	31.8×10^6	-5.765
56	-	31.9×10^6	-

$$R^2 = 0.876$$

$$a = 1.64$$

$$r = -0.155$$

RASPADO PLANTA CAÑASGORDAS: $K = 4.1 \times 10^6$ (ALGAS)

TIEMPO (HORAS)	N (obs)	N (model)	Ln (K-N/N)
0	1.2×10^6	1.95×10^6	0.882
4.5	2.9×10^6	2.31×10^6	-0.882
10.5	3.2×10^6	2.8×10^6	-1.268
14.5	3.4×10^6	3.02×10^6	-1.580
18.5	2.3×10^6	3.25×10^6	-0.245
24.5	3.6×10^6	3.53×10^6	-1.974
30.5	-	3.72×10^6	-
36.5	-	3.85×10^6	-
42.5	-	3.94×10^6	-
48.5	-	4.0×10^6	-
54.5	-	4.04×10^6	-
60.5	-	4.07×10^6	-

$$R^2 = 0.47$$

$$a = 0.10$$

$$r = -0.0782$$

**CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL MODELO
PARA PROTOZOARIOS**

A) PROTOZOARIOS - RASPADO - PRUEBA 1 : K = 66250

Tiempo (horas)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	0	2160	-
4.5	1250	2373	3,951
10.5	0	2688	-
16.5	0	3042	-
22.5	0	3442	-
28.5	5000	3890	2,505
34.5	0	4393	-
40.5	5000	4955	2,505
46.5	5000	5583	2,505
52.5	10000	6282	1,727
58.5	6250	7059	2,262
64.5	7500	7919	2,058
70.5	12500	8868	1,458
76.5	12500	9912	1,458
82.5	11250	11055	1,586
88.5	13750	12300	1,339
94.5	15000	13652	1,228
100.5	20000	15110	0,838
106.5	16250	16675	1,123
112.5	13750	18343	1,339
118.5	13750	20110	1,339
124.5	26250	21970	0,421
130.5	13750	23913	1,339
136.5	17500	25927	1,024
142.5	22500	28000	0,665
148.5	47500	30112	-0,929
154.5	38750	32250	-0,342
160.5	28750	34396	0,265
166.5		36531	
172.5		38638	
178.5		40700	
184.5		42701	
190.5		44630	
196.5		46473	
202.5		48223	
208.5		49872	
214.5		51417	
226.5		54188	
250.5		58496	
274.5		61403	
298.5		63276	
322.5		64446	
346.5		6.5163	
370.5		65598	
394.5		65860	
418.5		66018	

$R^2 = 0.816$
 $a = 3.39$
 $r = -0.02156$

B. PROTOZOARIOS - RASPADO - PRUEBA 2 k = 31500

Tiempo (horas)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	0	109	-
6	1250	163	3.186
12	0	244	-
18	0	364	-
24	0	542	-
30	0	805	-
36	0	1190	-
42	1250	1749	3.186
48	2500	2549	2.451
54	2500	3670	2.451
60	3750	5195	2.001
66	5000	7189	1.667
72	7500	9669	1.163
78	6250	12561	1.396
84	13750	15696	0.255
90	10000	18836	0.765
96	18750	21739	-0.385
102	21250	24234	-0.729
108	26250	26245	-1.609
114	28750	27785	-2.347
120	31250	28918	-4.828
126	-	29728	-
132	35000	30293	-
138	33750	30684	-
144	31250	30950	-4.828
150	38750	31130	-
156	-	31252	-
162	-	31334	-
168	-	31389	-
172	-	31415	-
178	-	31443	-

$$R^2 = 0.87$$

$$a = 5.66$$

$$r = -0.0673$$

C. PROTOZOARIOS - ARADO - PRUEBA 1: K = 31250

Tiempo (horas)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	3750	11578	1.992
3	15000	12043	0.080
9	13750	12993	0.241
15	13750	13963	0.241
21	25000	14946	-1.386
27	21250	15935	-0.754
33	17500	16921	-0.241
39	20000	17897	-0.575
45	12500	18855	0.405
51	21250	19788	-0.754
57	17500	20691	-0.241
63	22500	21557	-0.944
69	15000	22383	0.080
75	21250	23164	-0.754
81	20000	23899	-0.575
87	23750	24587	-1.152
93	27500	25226	-1.992
99	30000	25818	-3.178
105	26250	26363	-1.658
111	30000	26862	-3.178
117	20000	27319	-0.575
123	31250	27733	-
129		28109	
135		28449	
141		28756	
153		29278	
165		29697	
177		30031	
189		30295	
201		30504	
213		30667	
225		30796	
249		30974	
273		31083	
297		31149	
321		31189	

$R^2 = 0.47$
 $a = 0.534$
 $r = -0.0211$

D. PROTOZOARIOS - ARADO - PRUEBA 2
K = 92500

Tiempo (horas)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	60000	71088	-0.613
4	82500	71861	-2.110
10	85000	72983	-2.427
16	78750	74060	-1.745
22	72500	75092	-1.287
28	118750	76079	-
34	43750	77021	0.108
40	75000	77919	-
46		78775	-
52	78750	79589	-1.745
58		80362	-
64	86250	81095	-2.624
70	77500	81790	-1.642
76	86250	82448	-2.624
82	92500	83070	-
88	142500	83657	-
100		84735	
112		85692	
136		87288	
160		88527	
184		89482	
208		90213	
232		90771	
256		91194	
280		91515	
304		91758	
328		91941	
352		92079	
376		92183	
400		92261	
424		92320	

$R^2 = 0.14$
 $a = -1.2$
 $r = -0.0119$

E. PROTOZOARIOS - RASPADO - COLOMBO BRITANICO

Tiempo (horas)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	3.0 X 10 ⁶	4.15 X 10 ⁶	1.698
6	6.4 X 10 ⁶	5.68 X 10 ⁶	0.708
12	8.1 X 10 ⁶	7.50 X 10 ⁶	0.333
18	9.5 X 10 ⁶	9.49 X 10 ⁶	0.041
26	10 X 10 ⁶	12.1 X 10 ⁶	-0.061
32	17.5 X 10 ⁶	13.9 X 10 ⁶	-2.220
38	28.1 X 10 ⁶	15.4 X 10 ⁶	-
44	14.4 X 10 ⁶	16.6 X 10 ⁶	-1.057
48		17.2 X 10 ⁶	
52		17.7 X 10 ⁶	
60		18.4 X 10 ⁶	
68		18.8 X 10 ⁶	
76		19.1 X 10 ⁶	
84		19.2 X 10 ⁶	

$R^2 = 0.73$
 $a = 1.297$
 $r = -0.0698$

F. PROTOZOARIOS - RASPADO - CAÑASGORDAS: K = 1.32 X 10⁶

Tiempo (horas)	N (medido)	N (modelo)	Ln (K-N/N)
0	0.16 x 10 ⁶	0.24 x 10 ⁶	1.981
4.5	0.37 x 10 ⁶	0.30 x 10 ⁶	0.942
10.5	0.36 x 10 ⁶	0.40 x 10 ⁶	0.980
14	0.72 x 10 ⁶	0.46 x 10 ⁶	-0.182
18.5	0.53 x 10 ⁶	0.55 x 10 ⁶	0.399
24.5	0.55 x 10 ⁶	0.68 x 10 ⁶	0.336
30.5		0.80 x 10 ⁶	
36.5		0.92 x 10 ⁶	
42.5		1.02 x 10 ⁶	
48.5		1.10 x 10 ⁶	
54.5		1.16 x 10 ⁶	
60.5		1.20 x 10 ⁶	
66.5		1.24 x 10 ⁶	
78.5		1.28 x 10 ⁶	
90.5		1.30 x 10 ⁶	
102.5		1.31 x 10 ⁶	

$R^2 = 0.60$
 $a = 1.509$
 $r = -0.06389$

RESUMEN
A. PARAMETROS OBTENIDOS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES
PARA LA ECUACION LOGISTICA

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO	PRUEBA No.	PARAMETROS PARA ALGAS			PARAMETROS PARA PROTOZOOS		
			K	a	r	K	a	r
RASPADO	FLA 1 PILOTO	1	475000	3.27	-0.0257	66250	3.39	-0.0216
		2	868750	3.20	-0.0341	31500	5.66	-0.0673
ARADO	FLA 2 PILOTO	1	1'497500	0.31	-0.0295	31250	0.53	-0.0211
		2	2'140000	0.12	-0.0139	92500	-1.2	-0.0119
RASPADO FLA 2	PLANTA COLOMBO BRITANICO	1	32×10^6	1.64	-0.155	19.4×10^6	1.297	-0.0698
RASPADO FLA 3	PLANTA CAÑAS GORDAS	1	4.1×10^6	0.10	-0.0782	1.32×10^6	1.51	-0.0639

B. ECUACION LOGISTICA PARA CADA PRUEBA

TECNICA DE LIMPIEZA	TIPO DE FILTRO	PRUEBA No.	MODELO DE CRECIMIENTO POBLACIONAL	
			ALGAS	PROTOZOOS
RASPADO FLA 1	PILOTO	1	$N(t) = \frac{475000}{1 + e^{3.27 - 0.0257t}}$	$N(t) = \frac{66250}{1 + e^{3.39 - 0.0216t}}$
		2	$N(t) = \frac{868750}{1 + e^{3.20 - 0.0341t}}$	$N(t) = \frac{31500}{1 + e^{5.66 - 0.0673t}}$
ARADO FLA 2	PILOTO	1	$N(t) = \frac{1'497500}{1 + e^{0.31 - 0.0295t}}$	$N(t) = \frac{31250}{1 + e^{0.53 - 0.0211t}}$
		2	$N(t) = \frac{2'140000}{1 + e^{0.12 - 0.0139t}}$	$N(t) = \frac{92500}{1 + e^{-1.2 - 0.0119t}}$
RASPADO FLA 2	PLANTA COLOMBO BRITANICO	1	$N(t) = \frac{32 \times 10^6}{1 + e^{1.64 - 0.155t}}$	$N(t) = \frac{19.4 \times 10^6}{1 + e^{3.27 - 0.0257t}}$
RASPADO FLA 3	PLANTA CAÑAS GORDAS	1	$N(t) = \frac{4.1 \times 10^6}{1 + e^{0.10 - 0.0782t}}$	$N(t) = \frac{1.32 \times 10^6}{1 + e^{1.51 - 0.0639t}}$

ANEXO 1.3
DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a y r PARA EL MODELO DE
CRECIMIENTO POBLACIONAL DE ALGAS Y PROTOZOOS

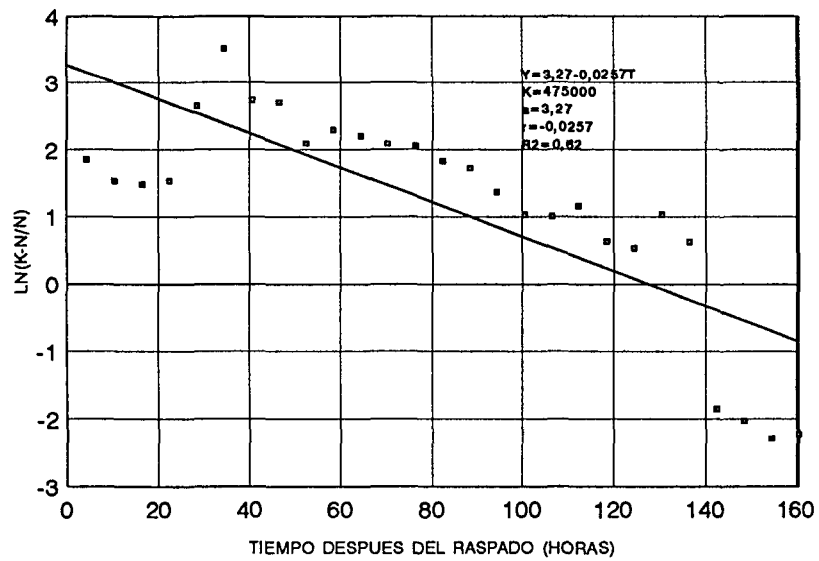


FIG 1.3.1 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA ALGAS FLA1 PILOTO RASPADO PRUEBA1

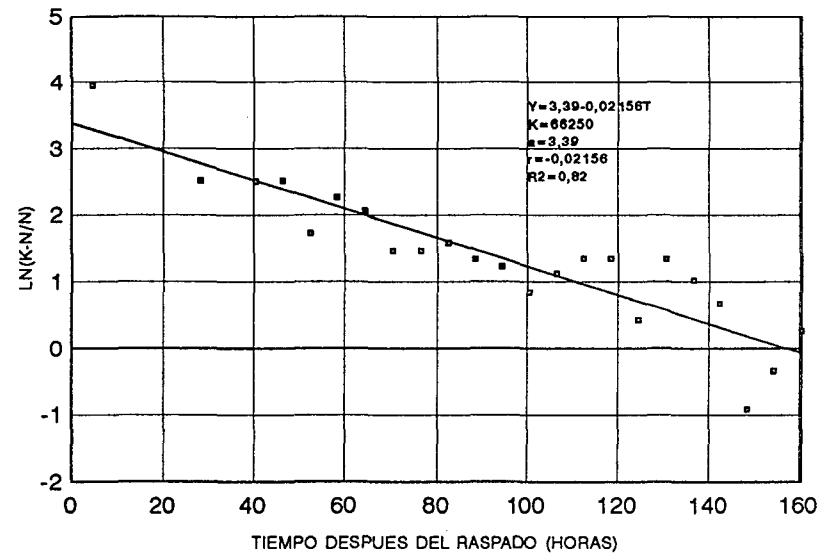


FIG 1.3.2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA PROTOZOOS FLA1 PILOTO RASPADO PRUEBA1

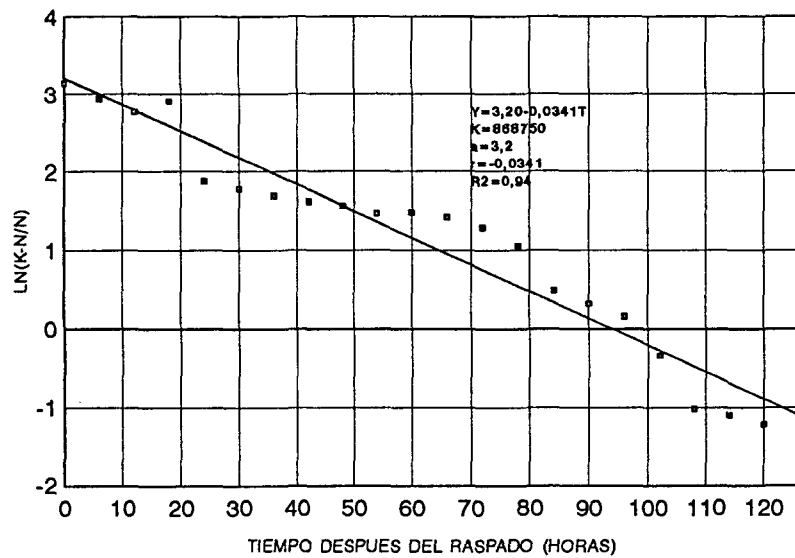


FIG 1.3.3 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA ALGAS FLA1 PILOTO RASPADO PRUEBA2

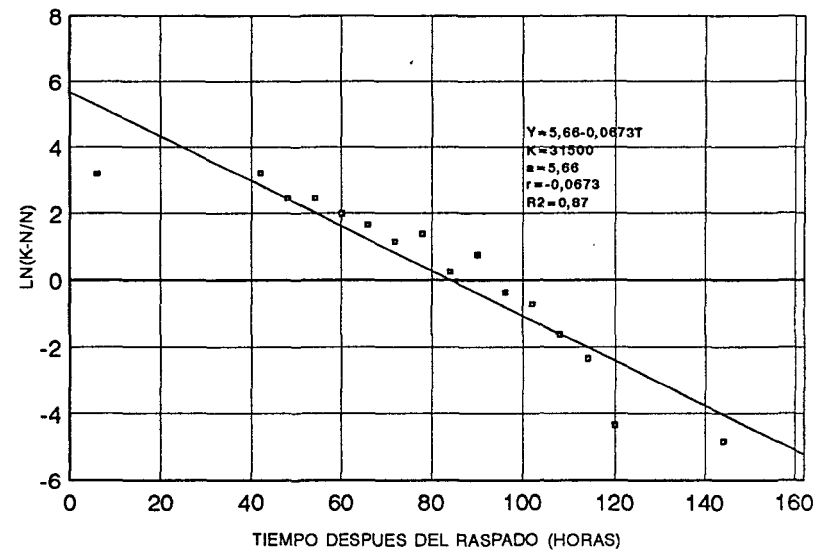


FIG 1.3.4 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA PROTOZOOS FLA1 PILOTO RASPADO PRUEBA2

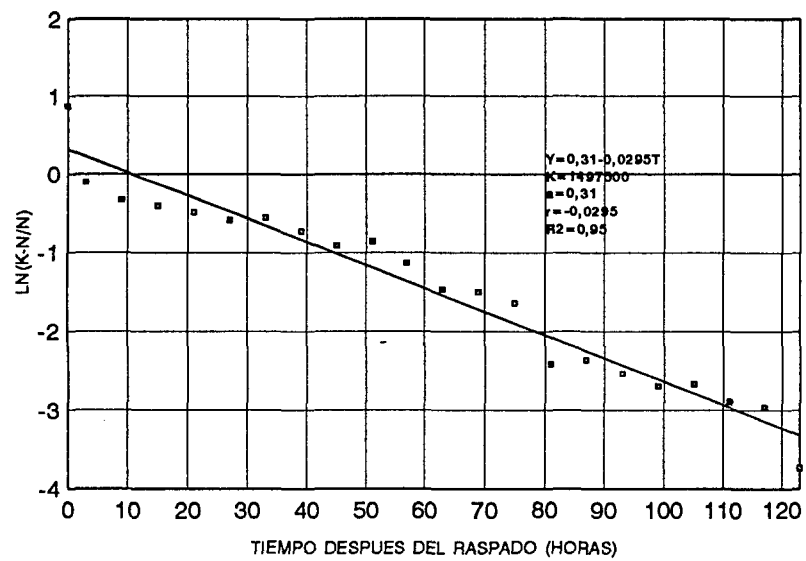


FIG 1.3.5 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA ALGAS FLA2 PILOTO ARADO PRUEBA1

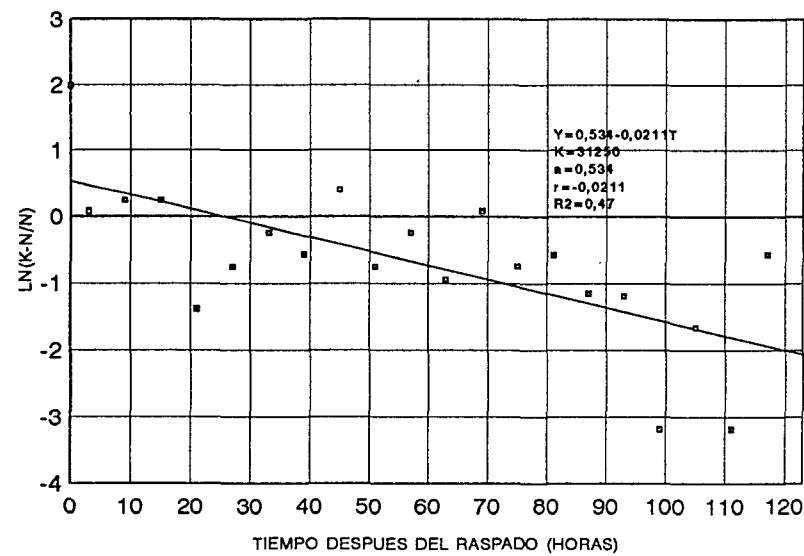


FIG 1.3.6 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA PROTOZOOS FLA2 PILOTO ARADO PRUEBA1

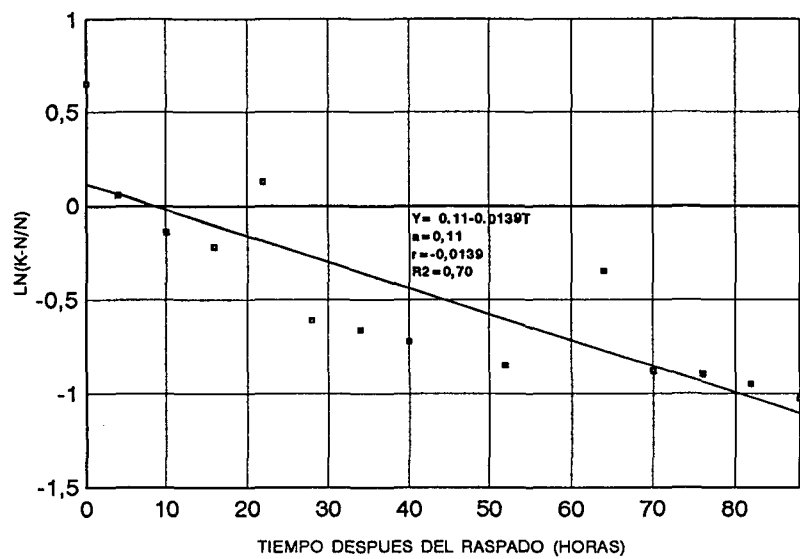


FIG 1.3.7 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA ALGAS FLA2 PILOTO ARADO PRUEBA2

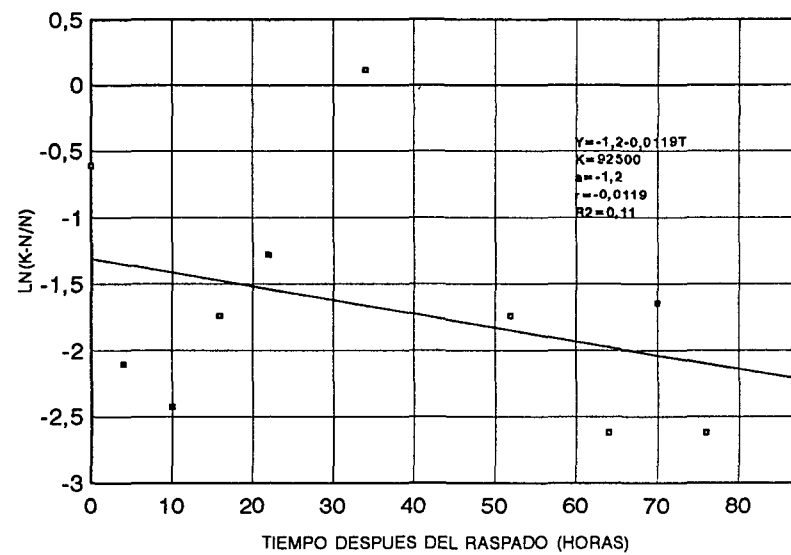


FIG 1.3.8 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA PROTOZOOS FLA2 PILOTO ARADO PRUEBA2

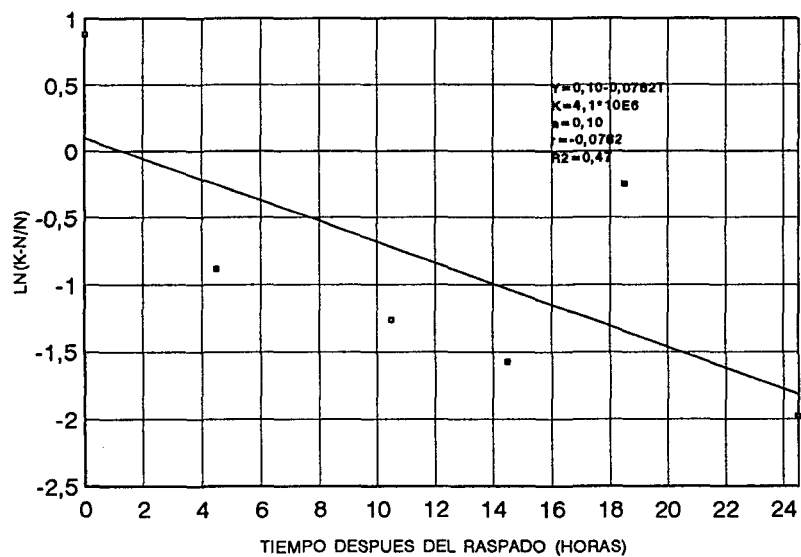


FIG 1.3.9 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA ALGAS FLA3 PLANTA CAÑASGORDAS.RASPADO

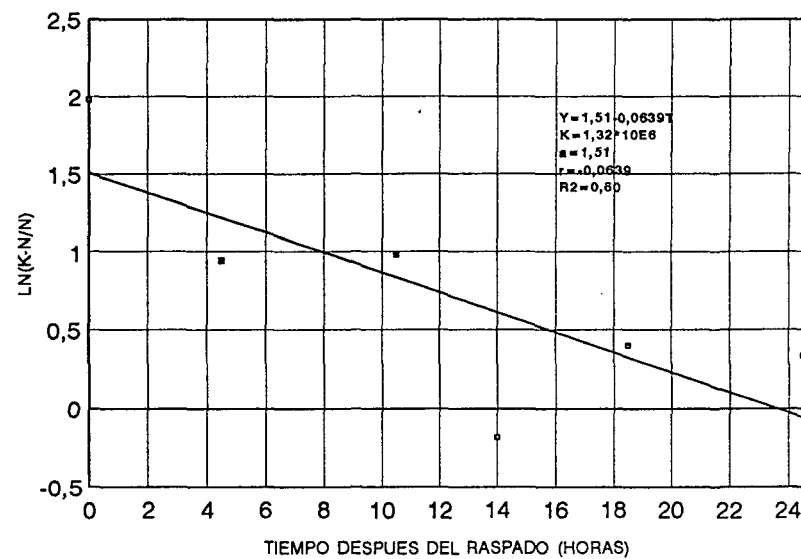


FIG 1.3.10 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA PROTOZOARIOS FLA3 PLANTA CAÑASGORDAS.RASPADO

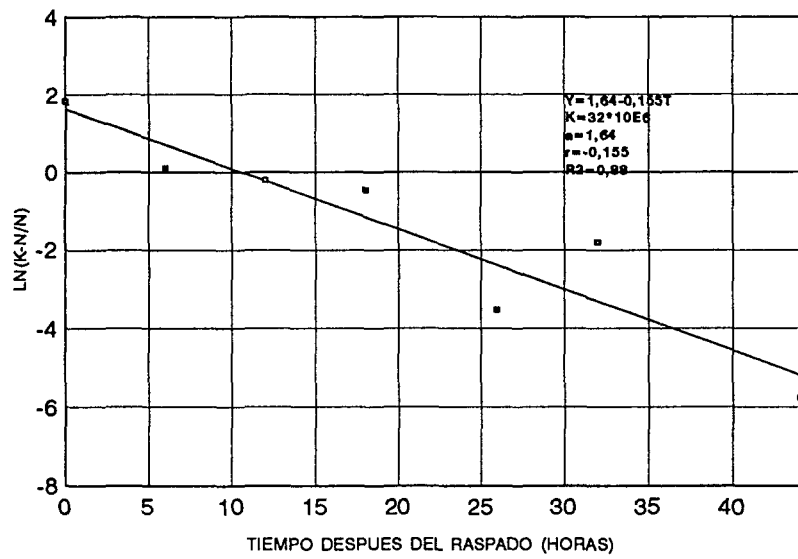


FIG 1.3.11 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA ALGAS FLA2 PLANTA COLOMBO BRITANICO.RASPADO

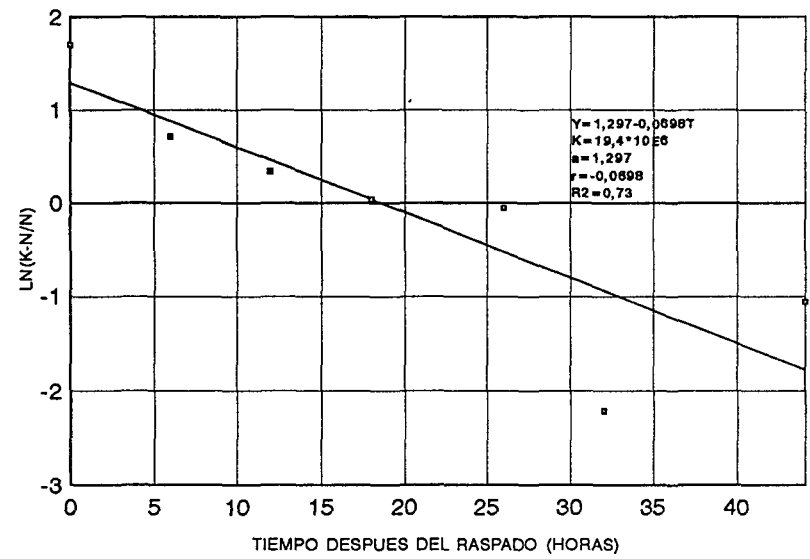


FIG 1.3.12 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS a Y r DE LA ECUACION LOGISTICA PARA PROTOZOARIOS FLA2 PLANTA COLOMBO BRITANICO.RASPADO

**ANEXO 1.4
CORRELACION ENTRE LA POBLACION DE ALGAS Y PROTOZOOS EN LAS DIFERENTES PRUEBAS**

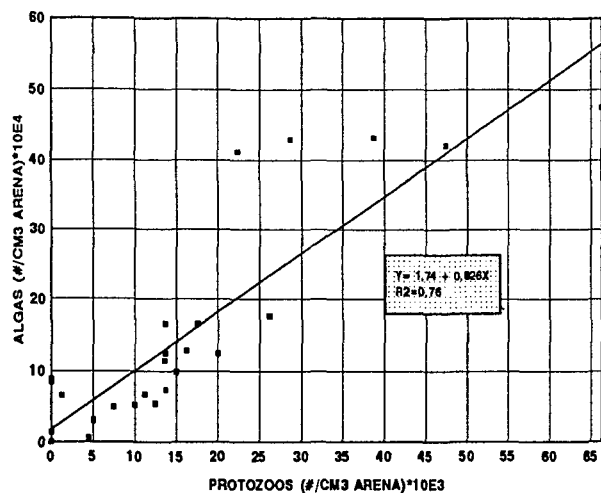


FIG 1.4.1 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS
FLA 1 PILOTO LIMPIEZA POR RASPADO PRUEBA1

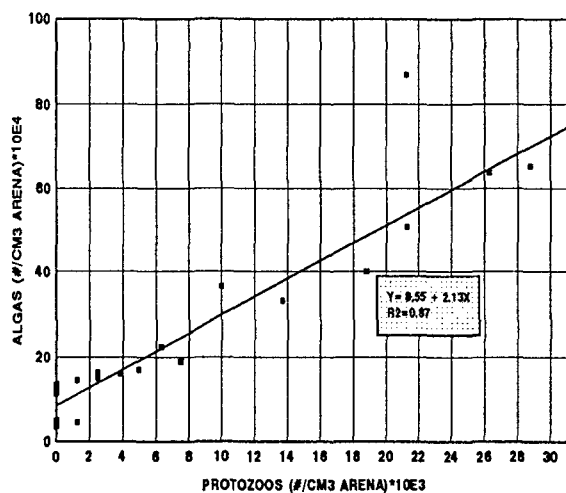


FIG 1.4.2 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS
FLA 1 PILOTO LIMPIEZA POR RASPADO PRUEBA2

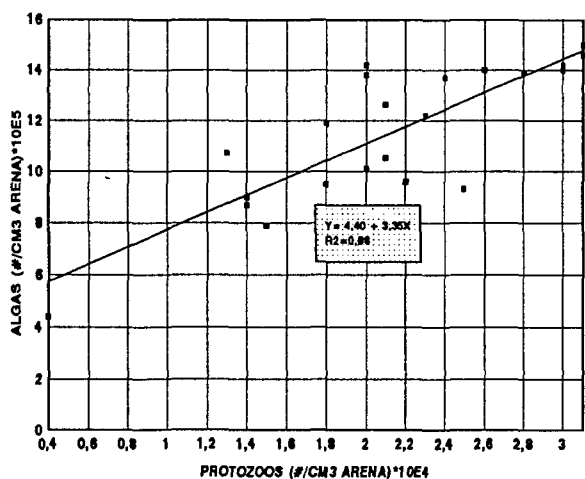


FIG 1.4.3 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS
FLA 2 PILOTO LIMPIEZA POR ARADO.PRUEBA1

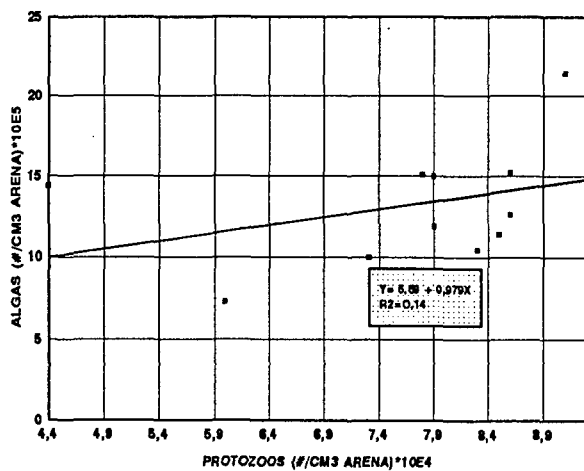


FIG 1.4.4 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS
FLA 2 PILOTO LIMPIEZA POR ARADO.PRUEBA2

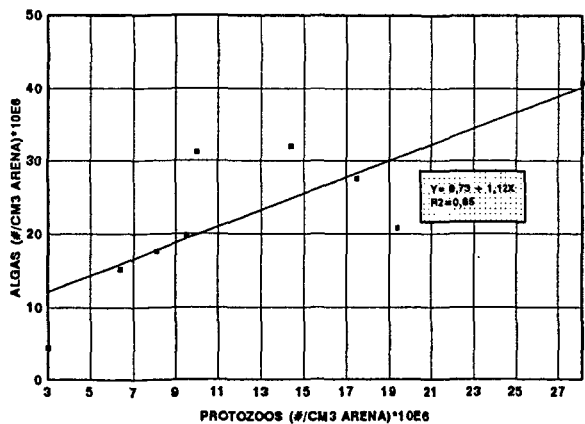


FIG 1.4.5 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS
FLA 2 LIMPIEZA POR RASPADO COLOMBO BRITANICO

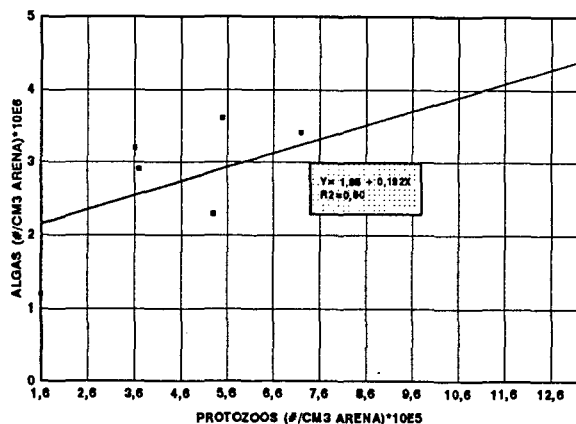
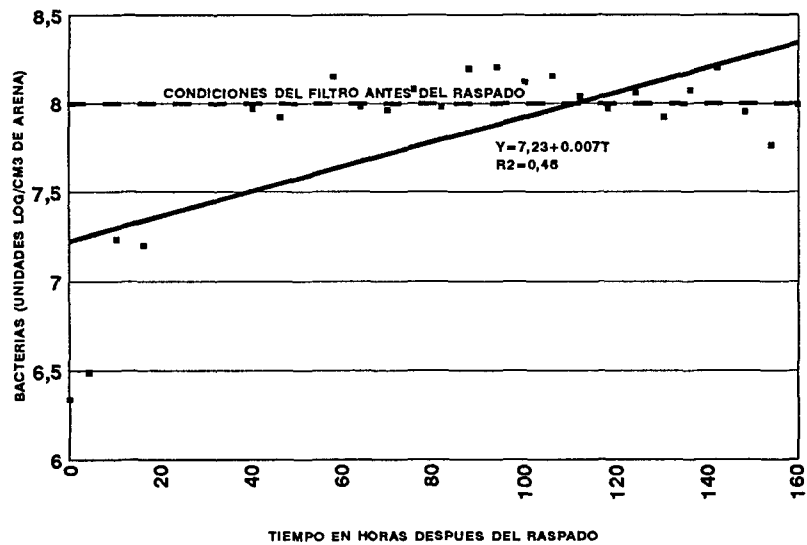
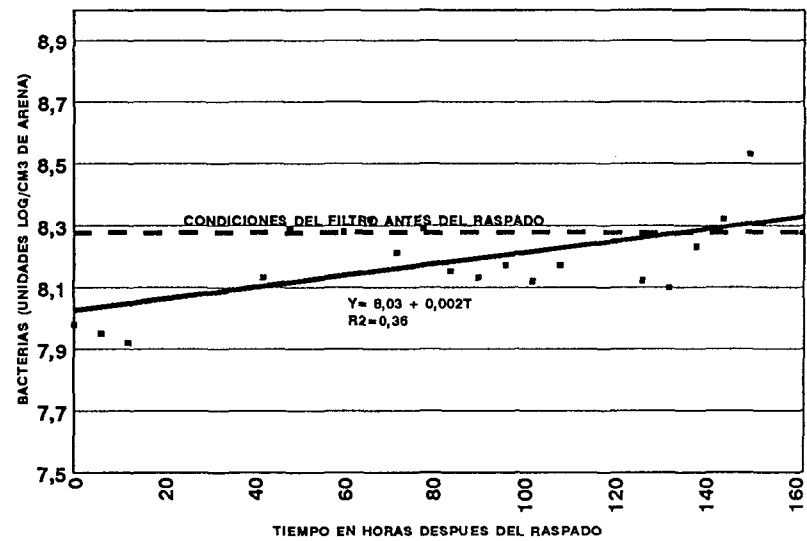


FIG 1.4.6 CORRELACION ENTRE ALGAS Y PROTOZOOS
FLA 3 LIMPIEZA POR RASPADO CAÑASGORDAS

**ANEXO 1.5
COMPORTAMIENTO DE LAS BACTERIAS DESPUES DE LA LIMPIEZA DE UN F.L.A**



**FIG 1.5.1 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA 1**



**FIG 1.5.2 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 1 PILOTO-PRUEBA 2**

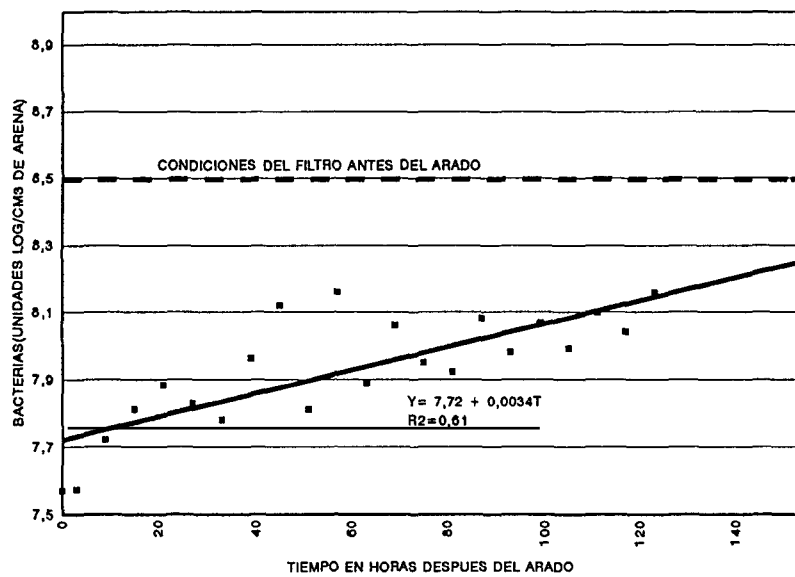


FIG 1.5.3 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO-PRUEBA1

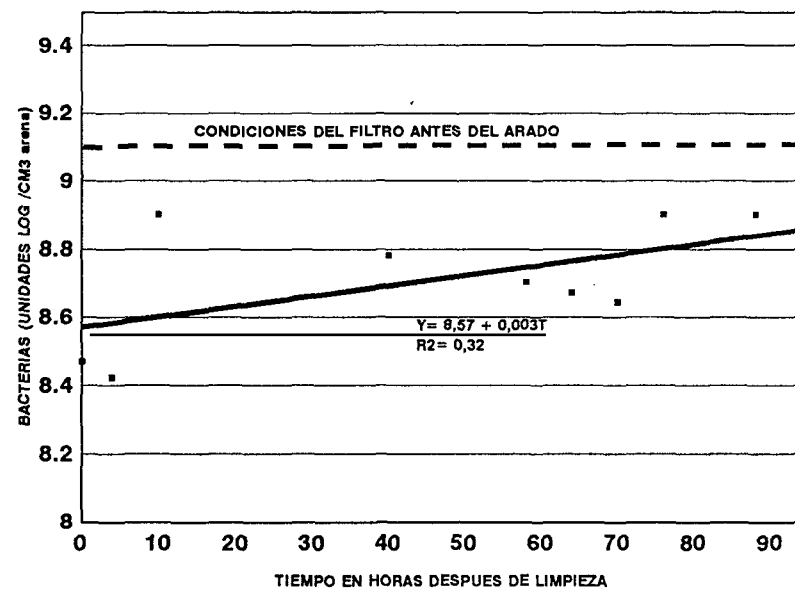


FIG 1.5.4 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL ARADO
F.L.A 2 PILOTO PRUEBA 2

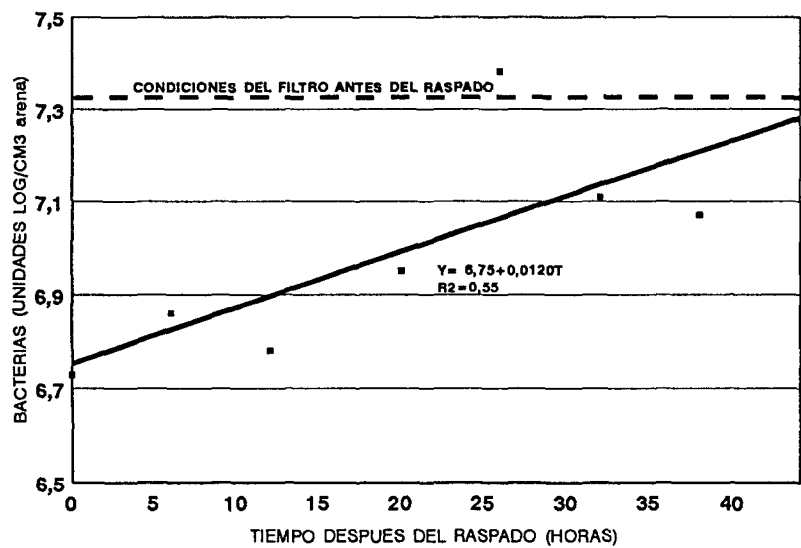


FIG 1.5.5 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 2 PLANTA COLOMBO BRITANICO

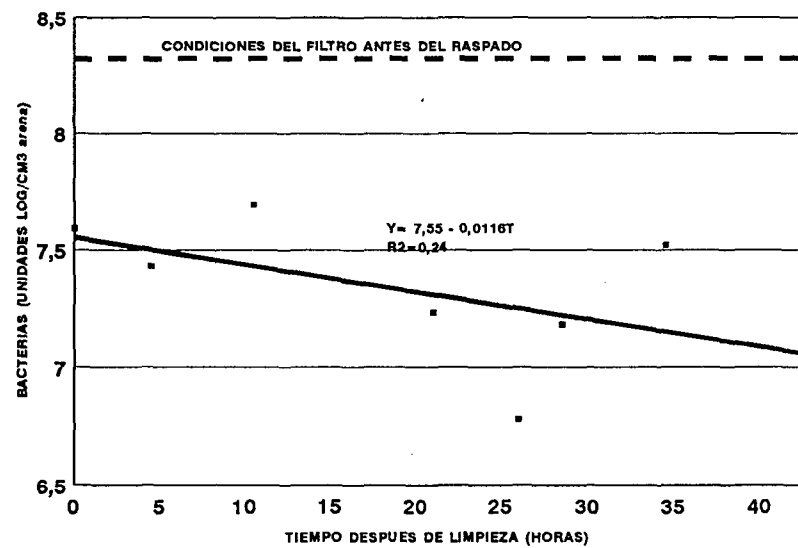


FIG 1.3.6 RECUENTO DE BACTERIAS DESPUES DEL RASPADO
F.L.A 3 PLANTA CAÑASGORDAS

ANEXO 1.6
 1.6.1 NITRATOS - FOSFATOS
 TABLA ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS
 PARA NITRATOS Y FOSFATOS DESPUES DE LA LIMPIEZA DE UN F.I.A.

Tecnica de limpieza	Tipo de Filtro evaluado	Prueba No.	Concentración de Nitratos (mg/l)				Concentración de Fosfatos					
			No.datos	Min	Max	Prom	desv. sd	No. de datos	Min	Max	Prom	Desv. sd
Raspado	F.L.A1 PILOTO	1										
			26	0.05	1.0	0.43	0.307	26	0.07	1.0	0.22	0.094
		2	26	0.05	1.16	0.10	0.307	26	0.017	1.262	0.36	0.337
Arado	F.L.A 2 PILOTO	1	22	0.04 0	0.21	0.091	0.038	22	0.013	0.225	0.067	0.056
		2	14	0.10	0.20	0.16	0.04	14	0.104	1.151	0.31	0.35
Raspado	F.L.A.2 PLANTA COLOMBO-BRITANICO	1	5	0.34	1.02	0.64	0.24	5	0.20	0.90	0.56	0.23
	F.LA 3 PLANTA CAÑASGORDAS	1	7	0.06	0.13	0.104	0.024	7	0.04	0.38	0.21	0.095

ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS PARA LA RELACION NITRATOS-FOSFATOS.
 DESPUES DE LA LIMPIEZA DE UN F.L.A

TABLA 1.6.2

Recarga de limpieza	tipo de filtro	prueba No.	Relación Nitratos-Fosfato			
			Min	Max	Prom	Desv. s d
RASPADO	F.L.A1 PILOTO	1	0.13	5.26	1.84	1.21
		2	0.06	4.80	0.84	1.14
ARADO	F.L.A 2 PILOTO	1	0.47	9.2	2.61	2.26
		2	0.55	10.4	1.98	2.67
RASPADO	F.L.A 2 PLANTA COLOMBO-BRITANICO	1	0.28	1.7	1.07	0.52
	F.L.A 3 PLANTA CAÑAS GORDAS	1	0.16	5.5	1.48	1.71

ANEXO 1.6.3 ANALISIS DE FRECUENCIAS RELACION N/P
 ARADO F.L.A 1 PILOTO PRUEBA 01

Rango N:P	Número de datos	% del total	Frecuencia acumulada
(0 - 0.5)	2	9.1	9.1
(0.51-1.0)	5	22.7	31.2
(1.1-2.0)	4	18.2	50
(2.1-3.0)	4	18.2	68.2
(3.1-4.0)	2	9.1	77.3
(4.1-6.5)	4	18.2	95.5
> 65	1	4.5	100
TOTAL	22	100%	

2. ARADO PRUEBA 2

RANGO N:P	# DATOS	% DEL TOTAL	FRECUENCIA ACUMULADA
(0.5-1.0)	7	50	50
(1.1-2.0)	4	28.6	78.6
(2.1-3.0)	1	7.1	85.7
> 3.0	2	14.3	100
TOTAL	14	100	

3. RASPADO: PRUEBA 1

RANGO N:P	# DE DATOS	% DEL TOTAL	FRECUENCIA ACUMULADA
<0.49	1	3.7	3.7
(0.5-1.0)	10	3.7	40.7
(1.1-2.0)	5	18.5	59.2
(2.1-3.0)	5	18.5	77.7
(3.1-4.0)	5	18.5	96.2
>40	1	3.8	100
TOTAL	27	100	

4. RASPADO: PRUEBA 2

RANGO N:P	NO. DATOS	% DEL TOTAL	FRECUENCIA ACUMULADA
<0.1	3	12.5	12.5
(0.1-0.5)	13	54.2	66.7
(0.51-1.0)	3	12.5	179.2
(1.1-2.0)	2	8.3	87.5
>2.0	3	12.5	100
TOTAL	24	100	

5. COLOMBO-BRITANICO

RANGO N:P	No. datos	% DEL TOTAL	FRECUENCIA ACUMULADA
<0.5	1	20	20
(0.5-1.0)	2	40	60
(1.1-2.0)	2	40	100
TOTAL	5	100	

6. CAÑASGORDAS

RANGO N:P	No. DATOS	% DEL TOTAL	FRECUENCIA ACUMULADA
<0.5	1	20	20
(0.5-1.0)	2	40	60
(1.1-2.0)	2	40	100
TOTAL	5	100	

ANEXO 1.7
TABLA 1.7.1
DATOS EXPERIMENTALES PARA SOLIDOS SUSPENDIDOS:
PRUEBA DE SEDIMENTACION EN COLUMNA - AGUA DE LAVADO PROCEDENTE DEL
RASPADO SUPERFICIAL DE UN F.L.A

TIEMPO DE SEDIMENTACION (MINUTOS)	ALTURA DE LA TOMA DE MUESTRA CON RELACION AL NIVEL DE AGUA EN LA COLUMNA			
	H ₁ = 26 cm	H ₂ = 46 cm	H ₃ = 61 cm	H ₄ = 71 cm
0	3875	4255	4045	4075
30	2825	2860	2890	2850
105	2330	2735	2635	2695
165	2860	2410	2685	2720
225	2480	2620	2525	2470
585	1835	2255	1430	2010
945	1865	2045	2250	2170
1305	2185	1930		1960
1665	1580	1800	1850	1850
2025	1190	1745	1685	1560
2385	1120	1950	1830	1880
2745	915	1280	1540	1240

**REMOCION DE PARTICULAS
EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACION**

TABLA 1.7.2

VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO cm/s	% DE PARTICULAS CON VELOCIDAD MENOR A UN VALOR DADO (S = H/T)
0.0001	
0.003	7
0.004	8
0.005	20
0.006	23
0.007	28
0.008	29
0.01	32
0.02	39
0.03	45
0.04	46
0.05	48
0.07	54
0.08	56
0.25	58
0.3	62
0.4	66
0.7	67
0.9	70
1.5	71
2	72