



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

**OPERACIÓN DE UNA PLANTA
PILOTO TIPO HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO
HORIZONTAL PARA
TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES Y SU REÚSO PARA
RIEGO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A

SANDRA EVANGELINA MILLÁN HERNÁNDEZ

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO, D.F.

1999

280177



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Profra. Leticia Ma. De los Angeles González Arredondo.
Vocal: Profr. Rodolfo Torres Barrera.
Secretario: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello.
1er suplente: Profr. Humberto Rangel Dávalos.
2do. suplente: Profra. Hilda Elizabeth Calderon Villagomez.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

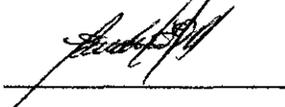
Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental
Laboratorio 301, Edificio E
Facultad de Química, UNAM.

Vivero Forestal de Coyoacán

Asesor: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

Sustentante: Sandra Evangelina Millán Hernández





AGRADECIMIENTOS

- ❖ Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por su apoyo incondicional, la confianza otorgada y por los conocimientos aportados al dirigir la presente tesis.
- ❖ A las personas que integraron mi jurado de examen por sus valiosos comentarios, los cuales hicieron que este trabajo tuviera una mejor calidad.
- ❖ A la bióloga Rosario Rodríguez, por su participación en la identificación de los grupos bacterianos presentes en el sistema de tratamiento, así como en el desarrollo y montaje de algunas técnicas de análisis fisicoquímicos.
- ❖ Al biólogo Fidel Armendariz, por el apoyo brindado en la realización de los análisis microbiológicos.
- ❖ Al Ing. Ciro Márquez, por el apoyo brindado en la realización de los análisis de detección de metales en agua, así como en el desarrollo de las técnicas de muestreo y de calidad en los análisis fisicoquímicos.

RECONOCIMIENTOS

- ❖ Al Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la Facultad de Química, UNAM, por el apoyo brindado para la realización de esta tesis.
- ❖ Al Proyecto CONACYT, clave 3302P-B, 1997 –1999 “Tratamiento de aguas residuales empleando sistemas de raíces en humedales”, por la beca otorgada para el desarrollo del trabajo.
- ❖ A los encargados del Vivero Forestal de Coyoacán, principalmente a la bióloga Sara Cabrera y a los ingenieros Aaron Mastache y Leonel Morales por el apoyo brindado dentro de las instalaciones.
- ❖ A la Facultad de Química de la UNAM por mi formación durante toda la carrera.

DEDICATORIAS

❖ A mi madre: Evangelina Hernández Navarro.

Por todo el apoyo, los consejos, sabiduría y amor que me has brindado siempre.....Gracias.

¡Ahora podemos compartir otro triunfo juntas!

❖ A mi familia

Principalmente a mi abuelita, a los Nava, los Rivera y los Grande, por el cariño que me han otorgado y por todas las facilidades brindadas para la culminación de este trabajo.

❖ A mis amigos

Por todos aquellos momentos (buenos y malos) que hemos pasado juntos, Hilda, Claudia, Alex, Teodoro, Jorge, Gonzalo, Rafael, Aurora, América, Isa, Trilce y Daniel, porque mucho de lo que soy es gracias a su amistad.

❖ A los chicos “humedales” y a la comunidad del PIQAYQA

Por todo el trabajo que hemos realizado juntos y que gracias a Dios está dando muy buenos frutos. Gracias Héctor, Mónica, Iván, Jesús, Paul, Rosario, Fidel, Karen, Tatiana, Xico y los que faltan.

Y sobre todo gracias a Dios por toda la fuerza y el amor que solo tú puedes darme.

“ Aquello que vivamente imaginas,
verdaderamente deseas,
sinceramente creas
y entusiastamente actúas
inevitablemente pasará “

“ No hacen falta alas
para ser más bello
basta el buen sentido
del amor inmenso “
¡ No hacen falta alas
para alzar el vuelo !

**OPERACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE
FLUJO HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
Y SU REÚSO PARA RIEGO**

ÍNDICE

Contenido	Página
Índice de tablas	
Índice de figuras	
Resumen	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	
1.1 Introducción	3
1.2 Objetivos	5
1.3 Estrategia de trabajo	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1 La problemática de las aguas residuales en pequeñas comunidades de México	8
2.2 La reutilización y reciclaje del agua	9
2.3 Humedales artificiales, una alternativa para el tratamiento de aguas residuales	12
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	
3.1 Localización	13
3.2 Agua de suministro	13
3.3 Características generales	14
3.3.1 Plantas vasculares	14
3.3.2 Medio de soporte	16
3.3.3 Microorganismos depuradores	17
3.4 Tren de tratamiento	18
3.5 Antecedentes de funcionamiento	20

CAPÍTULO 4. CONCEPTOS GENERALES DE OPERACIÓN

4.1 Aspectos básicos para la operación del humedal	24
4.1.1 Responsables de operación.	25
4.1.2 Unidades de proceso. descripción, operación y control del sistema piloto (HAFH)	26
4.1.3 Variables de operación	33
4.1.4 Condiciones de operación	36
4.1.5 Problemas operativos	38
4.2 Monitoreo	39
4.2.1 Parámetros a monitorear	39
4.2.1.1 Parámetros fisicoquímicos	40
4.2.1.2 Monitoreo de la vegetación	43
4.2.1.3 Parámetros microbiológicos	45
4.3 Mantenimiento	47
4.3.1 Mantenimiento preventivo	47
4.3.2 Mantenimiento de la vegetación	49
4.3.3 Manejo de residuos	50
4.4 Hidráulica del sistema	51
4.4.1 Patrón de flujo	51
4.4.2 Tiempo de residencia hidráulico	52
4.5 Eficiencia y estabilidad	53

CAPÍTULO 5. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE INTERÉS

5.1 Medición de las variables operativas	55
5.1.1 Evaluación del balance global de agua	58
5.2 Caracterización fisicoquímica	59
5.2.1 Programa de muestreo	60
5.3 Estudios preliminares de la hidráulica del sistema	62
5.3.1 Estudio mediante trazadores	63

5.3.2 Determinación del patrón de flujo en un reactor empacado con escoria volcánica.	65
CAPÍTULO 6. RESULTADOS	
6.1 Resultados operativos	72
6.2 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos	72
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
7.1 Resultados operativos	89
7.2 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos	90
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	
Anexo 1. Tabla general de balance hídrico	108
Anexo 2. Manual de operación y mantenimiento del sistema	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Tabla 2.1 Aplicaciones para la reutilización de aguas residuales municipales y principales problemas relacionados con cada uso	10
2. Tabla 3.1. Aportaciones de las plantas a los humedales artificiales	16
3. Tabla 4.1. Programa de monitoreo de parámetros fisicoquímicos	43
4. Tabla 4.2 Monitoreo de la vegetación	44
5. Tabla 4.3. Tareas de mantenimiento y operación para una planta piloto de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo horizontal.	48
6. Tabla 5.1 Recomendaciones para toma y conservación de muestras	61
7. Tabla 5.2 Pruebas de conductividad para elegir la concentración de NaCl como trazador a utilizar en el reactor experimental.	66
8. Tabla 5.3 Resultados obtenidos en las muestras tomadas en los puntos de muestreo del reactor operando a flujo continuo.	68
9. Tabla 5.4 Trazadores inertes para experimentos de respuesta en reactores empacados	70
10. Tabla 6.1 Balance global hídrico. Promedios mensuales	73
11. Tabla 6.2 Problemas operativos en el humedal artificial de flujo horizontal	77
12. Tabla 6.3 Resultados de caracterización fisicoquímica en el influente, efluente y porcentajes de remoción en presencia y ausencia de lluvias	80
13. Tabla 6.4 Resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos del agua residual cruda y tratada en el humedal	81
14. Tabla 6.5 Concentración de hierro en el agua tratada por el humedal	84
15. Tabla 6.6 Cuenta total de parámetros microbiológicos después de 48 horas de cultivo	85
16. Tabla 7.1a Extracto de la NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes básicos en las descargas de aguas residuales	91
17. Tabla 7.1b Extracto de la NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de metales pesados y cianuros en las descargas de aguas residuales	92

Tabla	Página
18. Tabla 7.2 NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas	92
19. Tabla 7.3 Concentración de contaminantes encontrados en el efluente del sistema durante el primer año de operación	93
20. Anexo1. Tabla general de balance hídrico	108

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Figura 3.1 Humedal artificial de flujo horizontal. Diagrama de flujo de proceso	19
2. Figura 4.1 Zona de suministro de agua cruda, procedente del río Magdalena	27
3. Figura 4.2. Vista superior de la fosa séptica o tanque sedimentador.	28
4. Figura 4.3. Tubos distribuidores, donde llega el agua sedimentada para ser alimentada al humedal.	30
5. Figura 4.4. Medidor de flujo de alimentación al humedal.	30
6. Figura 4.5. Vista general del sistema piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal.	31
7. Figura 4.6. Vista superior de la cisterna de almacenamiento de agua tratada.	32
8. Figura 4.7. La estación metereológica Coyoacán, localizada como a un kilómetro de distancia del humedal.	35
9. Figura 5.1. Esquema del pluviómetro experimental que se construyó para medir el volumen de precipitación en el humedal.	56
10. Figura 5.2. Sistema a escala experimental, con carrizos y escoria volcánica, construido para medir la evapotranspiración.	58
11. Figura 5.3 Curva de distribución de tiempo de residencia en función escalón.	63
12. Figura 5.4. Partes de la curva de distribución de tiempos de residencia	64
13. Figura 5.5. Diagrama del manejo experimental efectuado con el reactor empacado.	67
14. Figura 5.6. Modelo para experimento con trazadores en el humedal artificial de flujo horizontal ubicado dentro del Vivero Forestal de Coyoacán.	71

Figura	Página
15. Figura 6.1 Balance global de agua en el mes de julio de 1998	74
16. Figura A-1. Mantenimiento de la fosa séptica	121
17. Figura A-2. Limpieza de tubos distribuidores	124
18. Figura A-3. Medidor de flujo FE-001	124
19. Figura A-4. "Te" para dar mantenimiento a la tubería del medidor FE-001	124
20. Figura A-5. Cisterna de almacenamiento vacía para proceder al mantenimiento.	130

RESUMEN

Dentro del desarrollo de un proyecto de investigación que incluye el diseño y construcción de humedales artificiales como una alternativa técnica y económicamente viable para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades en México, se continúa el seguimiento del mismo, con la operación de un sistema piloto de flujo horizontal subsuperficial de 75 m² de área, construido dentro de los Viveros Forestales de Coyoacán. El sistema está diseñado para tratar un promedio de 5.6 m³/d de las aguas negras conducidas por el río Magdalena y se pretende reusar el agua para riego dentro del mismo vivero.

Los puntos de interés se centran en la identificación de las variables operativas y el monitoreo de la calidad del influente y efluente con datos fisicoquímicos y biológicos. Para este fin, se plantea el desarrollo un plan de monitoreo en donde los parámetros mínimos considerados son materia orgánica disuelta medida como demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno, DBO₅ y DQO, respectivamente, así como sólidos, bacterias y nutrimentos. En particular, se pretende identificar los problemas operativos que puedan reflejarse en la estabilidad y eficiencia del tratamiento y de este modo hacer una propuesta de las actividades preventivas y correctivas de operación y mantenimiento para asegurar la calidad operativa del sistema.

Las condiciones de operación se pueden dividir en dos etapas, en presencia de lluvia y en ausencia de ésta. Es importante hacer esta división, debido a que las variables operativas se ven influenciadas por efecto de la temperatura, dilución de contaminantes y aumento de la carga hídrica en temporada de lluvias.

Uno de los objetivos es el reúso del agua tratada para fines de riego, esto implica que la calidad del efluente obtenida debe de cumplir con la normatividad ambiental vigente para reúso en riego y estar dentro de los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas para la descarga de aguas residuales y para el reúso de aguas tratadas.

Los resultados de ocho meses de operación, comprendidos de julio de 98 a febrero de 99, muestran una eficiencia de remoción de materia orgánica promedio del 74% en términos de

DBO₅ y de 75% como DQO. En cuanto a la remoción de nitrógeno amoniacal, esta fue de 80%, mientras que sólo se logró el 20% en la eliminación de fósforo total.

Los resultados obtenidos en la remoción de contaminantes están dentro de los reportados para humedales artificiales en el inicio de su operación.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El sistema presentado en este trabajo se considera como un “sistema natural” para el tratamiento de aguas residuales, ya que aprovecha componentes del ambiente como plantas, microorganismos y suelo, y que además armoniza con el paisaje. Además, tiene la ventaja de que requiere bajo gasto de energía, así como de personal de operación.

El propósito del estudio es conocer la operación del sistema y su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales bajo las condiciones climatológicas prevalecientes de nuestro país y proponer una estrategia de monitoreo que permita llevar un seguimiento el comportamiento depurativo del mismo y, de este modo, evaluar su calidad operativa. En cierta forma el sistema de monitoreo es requerido para asegurar la calidad del efluente y va de la mano con las actividades de operación, pues cuando las descargas sobrepasan los estándares establecidos se debe hacer una evaluación de las condiciones de operación y proponer cambios para incrementar la eficiencia y mejorar la calidad del efluente. Por tal motivo, se revisan las necesidades que permitan una operación segura y flexible de sistemas de este tipo. De manera complementaria, se hace una evaluación de las condiciones bajo las cuales se puede mejorar la eficiencia del tratamiento y de los métodos o acciones para cambiar las condiciones de operación cuando el sistema tenga requerimientos no anticipados.

La mejor aproximación para el diseño de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales se basa en la caracterización físicoquímica del agua de alimentación, las condiciones ambientales y la disposición final del agua tratada, todo lo anterior bajo las condiciones “normales de operación” de sistemas existentes, reportadas en la literatura. Los puntos antes mencionados son aspectos muy importantes en este estudio. Uno de los principales alcances del proyecto, es el identificar las variables críticas y los problemas operativos en condiciones reales de operación, y con base en ello, proponer la implementación de humedales artificiales como sistemas de tratamiento de aguas residuales para pequeñas comunidades en México.

Otro de los alcances de este estudio es dar la pauta para el desarrollo de la siguiente etapa del proyecto que es la optimización del sistema, en la cual los objetivos a desarrollar se plantearían en función de maximizar la capacidad y eficiencia del tratamiento bajo diferentes escenarios y minimizar los costos durante el diseño, construcción, y operación de los humedales artificiales. Cabe señalar que de manera normal este tipo de sistemas requiere de aproximadamente un año de operación para alcanzar su estabilidad operativa e iniciar su periodo de máxima eficiencia depuradora. En este sentido debe tenerse en cuenta esta característica al momento de analizar los resultados obtenidos a la fecha ya que constituyen el primer año de operación.

A continuación se presentan los objetivos y estrategia de trabajo planteadas para la presente tesis.

1.2 OBJETIVOS

- Identificar y describir las variables de operación de la planta piloto, así como los problemas operativos derivados de la etapa de diseño que afecten la eficiencia depuradora.
- Proponer las actividades mínimas necesarias para una correcta operación y mantenimiento del sistema.
- Elaboración de un plan de monitoreo, con los parámetros mínimos necesarios, que indique la calidad operativa del sistema y facilite la operación y mantenimiento del mismo.
- De acuerdo con la calidad del agua tratada por el sistema piloto, evaluar si cumple con los requerimientos para ser utilizada en el riego de plantas.

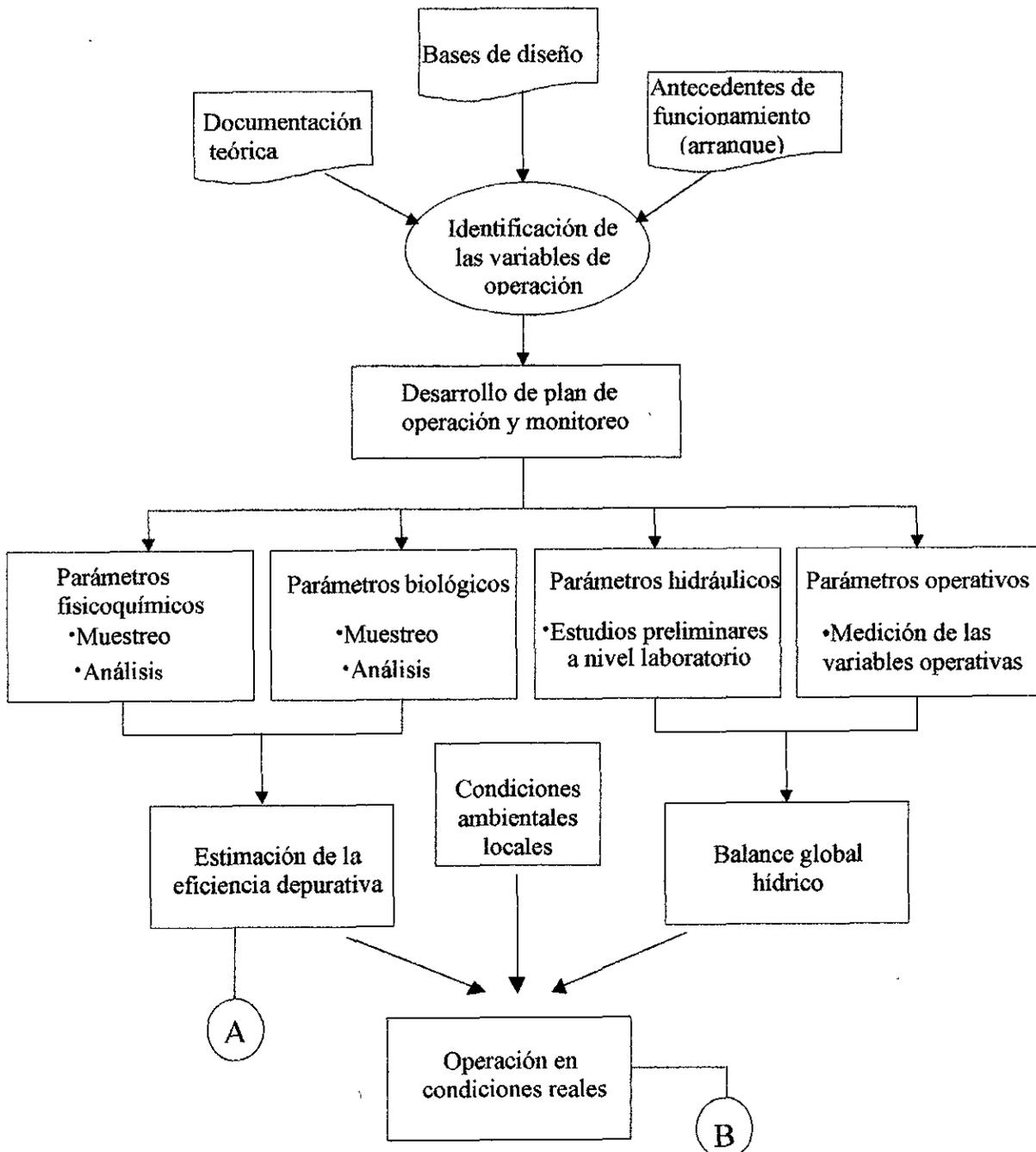
1.3 ESTRATEGIA DE TRABAJO

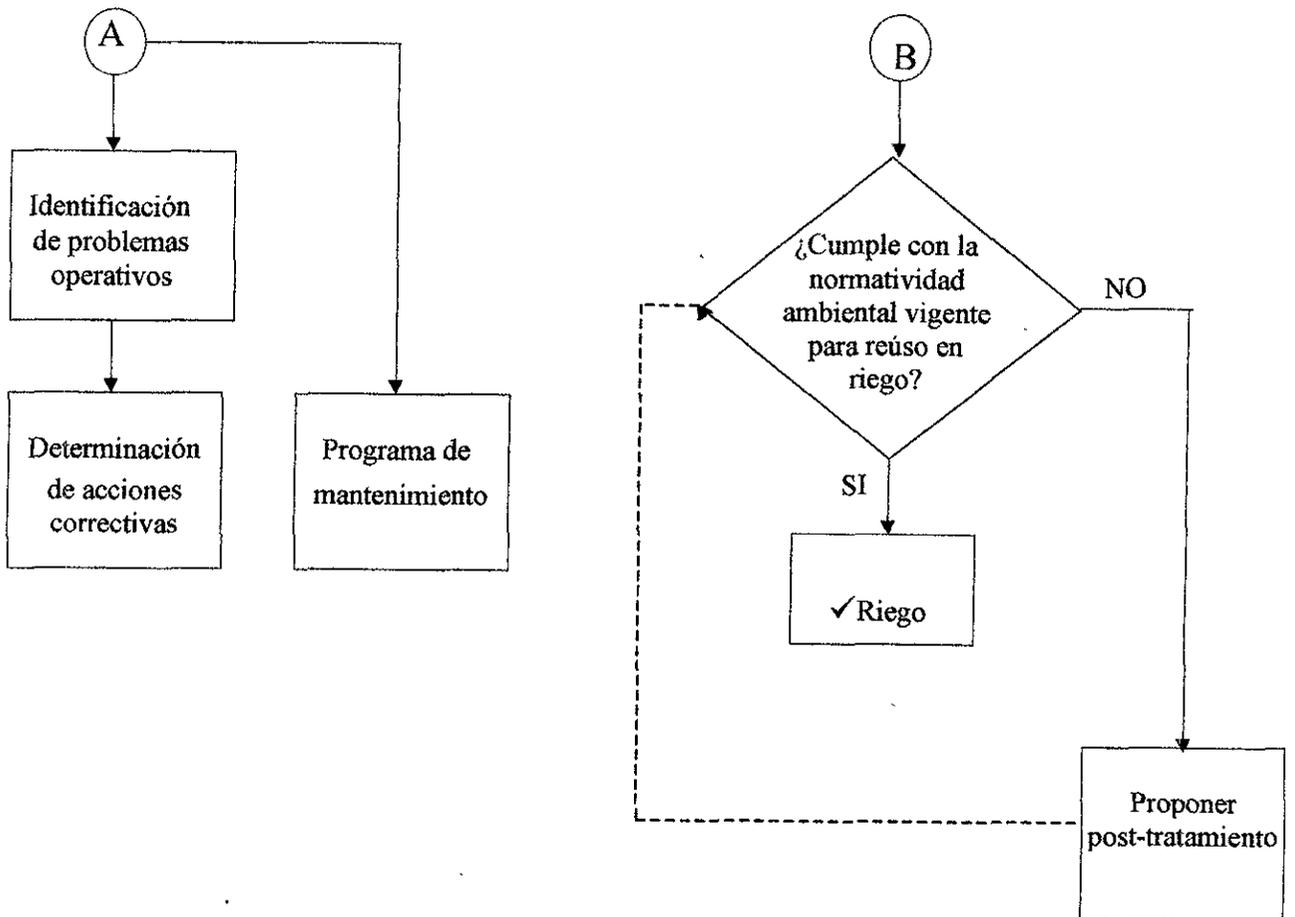
El presente estudio forma parte de una línea de investigación sobre el tratamiento de aguas residuales con sistemas de humedales artificiales de la Facultad de Química de la UNAM, para la cual se construyó un humedal artificial de flujo horizontal (HAFH) a escala piloto. Primeramente se menciona la problemática del agua residual en México, particularmente de las pequeñas comunidades, para las cuales los humedales artificiales son una opción viable para el tratamiento del agua residual y el aprovechamiento del agua tratada.

Para el desarrollo de la parte central de este trabajo, que es la operación del HAFH arriba mencionado, se hace una descripción detallada del mismo y se incluyen como antecedentes los resultados obtenidos en la etapa de arranque. Como punto siguiente, se identifican los parámetros útiles para poder evaluar la calidad operativa, la estabilización y para controlar

la operación del sistema. Con estos puntos, se mencionan las actividades principales para la operación y el mantenimiento del humedal artificial y finalmente, a través de tablas y gráficas, se presentan los resultados obtenidos para evaluar la calidad del efluente obtenido y verificar si cumple con la normatividad ambiental para el reúso de agua tratada en riego de plantas.

La estrategia a seguir de modo detallado se puede apreciar en el siguiente diagrama:





CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

MARCO TEÓRICO

2.1 LA PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES EN PEQUEÑAS COMUNIDADES DE MÉXICO

Una de las preocupaciones principales en el ámbito nacional es el nivel de contaminación que ha alcanzado el agua, ya que es uno de los recursos más valiosos para la humanidad. Hoy en día, las grandes concentraciones de población en las comunidades provocan una demanda de agua mayor, y se genera, al mismo tiempo, una enorme cantidad de aguas residuales que requieren de tratamientos especiales, si no para reutilizar el agua, al menos, para no contaminar el suelo y los cuerpos de agua que las reciben.

Prácticamente no hay río, mar o lago que no se encuentre contaminado por aguas negras municipales, plaguicidas, aceites, detergentes y en general por una cantidad de desechos que afectan la pureza de sus aguas y el desarrollo de la vida acuática en las mismas, modificando o eliminando la flora y la fauna existentes, rompiendo el equilibrio del ecosistema, así como el balance entre el hombre y su medio.

Un informe del censo nacional de población y vivienda de 1995 del INEGI señala que en el país, de aproximadamente 19 millones de viviendas particulares, solamente el 70 % cuenta con drenaje y que de ese porcentaje la mitad está conectado a la red pública y el restante tiene descargas a fosas sépticas, cuerpos de agua, grietas y barrancas. Este último es el caso de las comunidades pequeñas en las cuales generalmente no se cuenta con los recursos económicos y tecnológicos adecuados para conducir de una forma segura las aguas negras, y mucho menos para darles un tratamiento. Además, si se toma en cuenta que el costo por abastecimiento de agua potable tiende a incrementarse en algunas regiones de México, ya que los acuíferos se encuentran sobreexplotados y es necesario traer agua de cuencas cada vez más lejanas a ellas, provoca que el ahorro del vital líquido y su tratamiento para reúso sea indispensable para apoyar las crecientes necesidades municipales, industriales y agrícolas (Mugica, 1996).

Buscando dar solución a esta problemática, se han desarrollado una gran variedad de técnicas y procesos para el tratamiento de contaminantes tanto domésticos como industriales.

El tratamiento de las aguas residuales en México, ha recibido en los últimos 10 años un fuerte impulso y es considerado como una de las principales estrategias adoptadas para preservar la calidad del agua, garantizar el desarrollo sustentable, mejorar la calidad de vida y proteger la salud pública (Comett et al., 1997).

2.2 LA REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DEL AGUA

El objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es producir un efluente que pueda ser descargado al ambiente sin dañarlo. Uno de los objetivos es el reúso con diversos fines, entre ellos, disminuir la cantidad de agua potable destinada a los centros urbanos e industriales o a actividades de riego. El otro objetivo es proteger la salud humana y lograr su desalojo al medio ambiente sin alterar el sistema ecológico (Comett et al., 1997).

Por reutilización o reúso del agua tratada se entiende la práctica de recuperar aguas degradadas para emplearlas, luego de aplicarles un nivel de tratamiento adecuado, con fines prácticos. Por reciclaje del agua se entiende la captura y recuperación de aguas degradadas, para volverlas a usar en el mismo proceso que las generó (National Academy of Sciences, 1995). Las aguas residuales municipales, que incluyen el agua generada en residencias, establecimientos comerciales, y a menudo en instalaciones industriales, son la fuente de agua de reúso de que se dispone más a menudo, luego de aplicárseles un grado satisfactorio de tratamiento. Otras fuentes de agua degradada que han sido tomadas en cuenta para su reutilización son el agua de lluvia de desagüe y el flujo que regresa de la irrigación agrícola. Sin embargo, la calidad de estas otras fuentes es menos predecible que la del agua municipal tratada, por lo que la conveniencia de su reúso no es tan segura (National Research Council, 1994). La tabla 2.1 (Metcalf y Eddy, 1991) identifica las posibles aplicaciones de las aguas municipales recuperadas, junto con los problemas de mayor importancia asociados a cada una de ellas. Los problemas derivados de la reutilización del

agua residual tratada son debidos a una mala planeación y deficiencias en el estudio de tratamientos adecuados.

Tabla 2.1 Aplicaciones para la reutilización de aguas residuales municipales y principales problemas relacionados con cada uso

<i>Aplicación para el reúso de aguas residuales</i>	<i>Problemas</i>
Irrigación Agrícola Irrigación de cosechas; Viveros Irrigación del paisaje urbano Parque; Patio de escuela; Valla de carretera; Campo de golf; Cementerio; Residencial	Contaminación del agua superficial y subterránea si no se maneja correctamente. Aceptación del público para la comercialización de cosechas. Efecto de la calidad del agua, particularmente de las sales, en la tierra y las cosechas. Problemas de salud pública relacionadas con agentes patógenos (bacterias, virus, y parásitos). Control del área de uso que abarca la zona de influencia.
Reciclaje y reutilización industrial Enfriamiento; Alimentación de calentadores; Agua procesada; Construcción pesada.	Componentes del agua residual recuperada relacionados con escamaduras, corrosión, crecimiento biológico y obstrucción. Problemas de salud pública causados por elementos patógenos.
Usos urbanos no potables Protección contra incendios; Aire acondicionado; Agua para inodoros	Problemas de salud pública causados por elementos patógenos. Efectos de la calidad del agua en descamación, corrosión, crecimiento biológico y obstrucción. Conexiones cruzadas en las tuberías.
Recarga de agua subterránea Relleno de agua subterránea.	Productos químicos orgánicos en las aguas recuperadas que puedan tener efectos tóxicos. Presencia de sólidos, nitratos y agentes patógenos.
Usos recreativos / ambientales Represas, lagos y estanques; Agrandamiento de pantanos; Aumento del flujo de la corriente; Pesquerías, Fabricación de hielo.	Problemas de salud debidos a bacteria y virus. Eutroficación debida a los compuestos derivados del fósforo y el nitrógeno al recibir el agua. Toxicidad que afecta la vida acuática.

En el área de servicio del Distrito Federal, las aguas residuales tratadas y reusadas se distribuyen de la manera siguiente: 83 por ciento para la irrigación de paisaje urbano y depósitos en áreas recreativas; 10 por ciento para uso industrial; 5 por ciento para irrigación agrícola; 2 por ciento para usos comerciales, como, por ejemplo, el lavado de automóviles (DDF, 1995b). Por otro lado, el país padece grandes períodos de estiaje de gran intensidad de calor, situación que provoca que las áreas verdes sufran prolongados períodos de sequía en los que las plantas están propensas a ser atacadas por plagas o a morir por falta de agua.

La reutilización segura de las aguas residuales en el riego de áreas verdes y zonas agrícolas es una necesidad urgente, por ello se ha tenido que estudiar la posibilidad de aplicar sistemas de tratamiento eficientes, que produzcan efluentes con la calidad requerida para riego según la normatividad mexicana. El tratamiento de aguas residuales mediante el uso de humedales artificiales es una alternativa que ofrece alta eficiencia, facilidad en la operación y mantenimiento, mínimos costos de operación y mantenimiento, producción mínima de malos olores, requerimientos mínimos de energía y por consiguiente de equipos mecánicos, baja generación de lodos y como es estéticamente agradable, mejora el entorno natural.

2.3 HUMEDALES ARTIFICIALES, UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los humedales artificiales son sistemas para el tratamiento biológico de aguas residuales, principalmente de tipo doméstico, fueron desarrollados en Alemania a principios de la década de los setentas, basados en las observaciones realizadas en los humedales naturales que se forman en zonas donde existen estancamientos de agua contaminada (Brix, 1994; Haberl, 1997). Estos sistemas han sido empleados en la depuración de aguas residuales de pequeñas comunidades y como sistemas complementarios en plantas de tratamiento ya existentes.

El elemento común en todos los sistemas de tratamiento naturales es el aprovechamiento de componentes del medio ambiente como plantas, microorganismos y suelo. El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en la retención y posterior biodegradación de los materiales presentes en el agua residual, a partir de la actividad de los microorganismos que se encuentran soportados en un lecho de material inerte (Reed, 1992; Rivera, 1994). Este último también actúa como medio filtrante y de soporte para los vegetales que aportan el oxígeno y promueven el flujo del agua mediante sus raíces. El proceso de tratamiento es aerobio en las áreas próximas a las raíces, y tiene un comportamiento anaerobio y anóxico en las zonas más alejadas de éstas, lo que permite que se desarrollen gran variedad de microorganismos capaces de biodegradar la materia orgánica presente en el agua residual.

Las ventajas de los humedales artificiales sobre otros sistemas son su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, asociadas a la producción de un efluente con una calidad de acuerdo con la normatividad nacional vigente. Estos sistemas tiene un tiempo de vida útil estimado en 25 años, son estéticamente agradables, contribuyen a la generación de áreas verdes y se adaptan fácilmente a las condiciones de México (Luna-Pabello et al., 1997).

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El humedal artificial que se estudió, se ubica dentro del vivero forestal de Coyoacán. Es un sistema de flujo horizontal subsuperficial (HAFH) de 75 m² de área con plantas vasculares emergentes donde el agua residual es alimentada continuamente por medio de un distribuidor al inicio del mismo y fluye lentamente al extremo opuesto donde es descargada. Sus dimensiones son 5 m de ancho, 15 m de largo y 0.6 m de profundidad con una pendiente del 1 %.

3.1 LOCALIZACIÓN

El Vivero forestal de Coyoacán está ubicado en el Distrito Federal, en la delegación política del mismo nombre, a una altitud de 2240 msnm, 19° 21' latitud norte y 99° 10' longitud oeste. Predomina el clima templado con lluvias en verano y tiene una humedad media.

En este sitio es vital el agua para riego, por lo que se decidió construir el humedal en ese sitio con la finalidad de aprovechar una parte de los recursos hídricos de las descargas residuales que conduce el río Magdalena, en el tramo a cielo abierto que atraviesa el vivero. El sistema se construyó a finales de 1997 y en marzo de 1998 fue puesto en operación como planta piloto a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.2 AGUA DE SUMINISTRO

El río Magdalena, antiguamente uno de los ríos más caudalosos y largos que en otras épocas abasteció de agua a los actuales Viveros de Coyoacán y alimentó las corrientes del río Churubusco, nace en la sierra de las Cruces, en la confluencia de los arroyos de Cieneguillas y Cerería, en el cerro de la Palma, a 3000 m sobre el nivel del mar. El cauce tiene una longitud total de 21,600 m de los cuales 11,000 m se localizan en las áreas verdes de la sierra de las Cruces, para después adentrarse en la zona urbana en un trayecto de 4,000 m de longitud, hasta llegar a la presa Anzaldo, de donde se incorpora al drenaje de la

ciudad como un cauce entubado con 6,600 m de longitud y dos tramos a cielo abierto, uno al salir de la presa y otro al atravesar los viveros de Coyoacán con una longitud de 2,000 m para descargar finalmente al río Churubusco. En el tramo llamado “Los cuatro Dinamos”, en la Delegación Magdalena Contreras todavía su cauce es de agua “cristalina” pero con la expansión de la ciudad al poniente y las áreas aledañas al cauce urbanizadas se ha provocado que la cuenca del río sea ocupada como drenaje de descargas residuales.

Ese es uno de los factores principales que han ocasionado el deterioro ambiental del río Magdalena y las barrancas de la región, además de la basura, desechos sólidos u otros objetos que son arrojados dentro del río (DDF, 1991). A la altura del primer dinamo, se desvía un volumen de aproximadamente 170-200 litros por segundo que es potabilizado en la planta llamada Magdalena y el resto se canaliza directamente al drenaje).

El agua que actualmente conduce el río en el tramo del vivero, y que es el agua que se alimenta al humedal para ser tratada, se puede considerar como agua residual mixta pues contiene descargas domésticas, de algunas industrias y agua de lluvia. El flujo es variable, su caudal llega a aumentar hasta en un 55% en temporada de lluvias y disminuye un 30% en época de estiaje (CNA, 1997).

3.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Se mencionó que los componentes principales del sistema son las plantas, los microorganismos y el suelo o lecho de soporte. A continuación se hace una descripción de cada uno de ellos con el objeto de conocer la función que desempeñan dentro del sistema y de este modo, entender la forma en que se lleva a cabo el tratamiento del agua.

3.3.1 Plantas vasculares

La importancia de las plantas en el sistema es en gran parte debida al tamaño de sus raíces y rizomas que se extienden en el medio de soporte y benefician la conductividad hidráulica, además, transfieren el oxígeno de las plantas hacia el substrato el cual es aprovechado por los microorganismos para realizar el tratamiento aerobio del agua residual; contribuyen a remover los nutrientes como compuestos de fósforo y nitrógeno, reducen la erosión y

mantienen la permeabilidad del suelo (Tabla 3.1). Se tiene información en la que se presentan resultados que indican que, de acuerdo al tipo de planta, éstas pueden fijar metales pesados en las diferentes partes vegetales como hojas, raíces y flores (Kreiner, 1995).

La eficiencia de las plantas vasculares en el sistema depende de la adaptación que tengan hacia el medio, y que les permita llegar a su etapa de madurez con raíces densas y profundas. Se ha encontrado que las plantas que tienen raíces más grandes y que se adaptan a este tipo de sistemas son los carrizos (*Phragmites australis*), papiros de pantano (*Scirpus lacustris*) y tules (*Typha latifolia*).

Las plantas vasculares empleadas en el sistema estudiado son, en su mayoría, carrizos y algunos papiros de pantano. Las características que poseen estas plantas las hacen altamente favorables para su implementación en humedales artificiales, ya que poseen una elevada productividad, resistencia a cambios bruscos de concentración de contaminantes y una gran adaptabilidad a distintas condiciones ambientales (Durán et al., 1998). Los carrizos tienen la habilidad de transportar el oxígeno tomado por sus hojas y tallos hacia los rizomas y hacia el lecho del humedal por las raíces.

Phragmites es una planta cosmopolita, se extiende desde 70° N en Noruega hacia los trópicos y el sur llegando casi hasta Chile y en lugares con altitud de 3000m como el Tíbet. La temperatura óptima para su desarrollo es de 20-30 °C. En temporada de heladas es probable la muerte de los extremos de las plantas emergentes, sin embargo los rizomas y raíces sumergidas son tolerantes y llegan a crecer aún en invierno. Los rizomas tienen un tiempo de vida estimado de 3 a 7 años (Brix, 1994). Crece en agua fresca, fango o substratos orgánicos y, ocasionalmente, en arena. La profundidad de agua que tolera depende de la especie y varía de 2 m a pocos centímetros, y la presencia de cambios en la profundidad del lecho causados por fuertes lluvias, inundaciones o sequía, reducen el crecimiento de la planta debido a que se adapta a un nivel específico de profundidad.

La distribución de los carrizos está dada por el nivel de nutrientes en el substrato y está limitado a áreas de mediana fertilidad y crece mejor a un pH de 5.5 a 7.5 unidades y requiere relativamente altos niveles de calcio. Esta especie no es tolerante a altos niveles de salinidad y su crecimiento se ve reducido en niveles de 0.2 mol/L (1.2%) NaCl.

Esta especie florece en temporada de otoño y la propagación de semillas es a través del viento; la germinación se da en primavera o al principio del verano y se da en suelo húmedo o a 1cm debajo de éste.

La propagación de plantas también es común al fragmentarse los rizomas; un segmento de aproximadamente 20 cm de longitud con tres nodos es capaz de producir una nueva planta.

3.3.2 Medio de soporte

El medio de soporte permite la retención de partículas sólidas suspendidas no removidas por sistemas de tratamiento previos, da soporte a las plantas y permite la proliferación de microorganismos depuradores. Es así como juega un papel importante en el mecanismo de remoción de contaminantes a través de interacciones físicas y químicas.

Los materiales comúnmente usados en este tipo de sistemas son la arena, arcilla y grava.

Tabla 3.1. Aportaciones de las plantas a los humedales artificiales

Parte de la planta	Actividad que realiza
Tallo de la planta en la zona superior del lecho	Atenuación solar que reduce el crecimiento del fitoplancton Apariencia estética Almacenamiento de nutrientes Aislamiento de climas fríos en invierno
Tallo en la zona inundada	Efecto filtrante Reducción de la velocidad efectiva que incrementa la razón de sedimentación y limita la suspensión de sólidos Provee un área para la formación de biomasa y aporta oxígeno para propiciar mayores condiciones aerobias en el medio Establecimiento de una capa de aislamiento durante las épocas de frío Fijación de nutrimentos
Raíces y Rizomas	Fomenta la conductividad hidráulica Previene la presencia de azolvamiento en los humedales de flujo vertical Aporta oxígeno que aumenta la degradación aerobia y contribuye a la nitrificación Fijación de nutrimentos Acumulación de microorganismos en la vecindad de las raíces

El medio de soporte que se colocó en el sistema piloto es escoria volcánica de diferentes diámetros. La distribución del tamaño de partícula quedó definida de acuerdo a los criterios de diseño del sistema y de acuerdo a la disposición final para el reúso del agua tratada.

La elección de este material como medio de soporte para el sistema piloto se fundamenta en una serie de experimentos realizados a nivel laboratorio, en los que se evaluaron la conductividad hidráulica y la remoción de materia orgánica principalmente (Ramírez, 1998). Cabe señalar que es la primera vez que se construye un humedal artificial con este material de soporte y con tan buenos resultados; por tal motivo, la Universidad está tramitando una patente para dicho sistema.

3.3.4 Microorganismos depuradores

De los microorganismos presentes en los sistemas de tratamiento biológico, las bacterias, los hongos y los protozoos son los más importantes. Las bacterias y los hongos son los encargados de descomponer la materia orgánica, mientras que los protozoos son los que eliminan las bacterias del agua, ya que es su principal fuente de alimento.

Las condiciones básicas que necesitan los microorganismos para sobrevivir en cualquier ambiente son alimento, oxígeno, agua y temperatura adecuada. En el suelo o sustrato, su sobrevivencia depende de varios factores, como la acidez o la alcalinidad, la concentración de sales, la dimensión de los poros, la cantidad de agua y las fluctuaciones temporales por la humedad (Bonilla, 1993).

La parte microbiológica del humedal es un sistema muy complejo para estudiar, pues se preocupa no solo de la identificación de organismos que colonizan una determinada masa de agua sino también, y principalmente, de las interrelaciones que existen entre los organismos y su medio ambiente.

3.4 TREN DE TRATAMIENTO

El tren de tratamiento consta de 3 etapas: tratamiento preliminar, tratamiento primario y el tratamiento biológico que se realiza en el propio humedal.

El tratamiento preliminar es un sistema de cribado colocado en la zona de succión, donde se realiza la toma del agua residual. El dispositivo consta de una rejilla de forma cuadrangular recubierta con malla de 0.5 mm de diámetro que tiene como propósito detener la basura y sólidos de gran tamaño que puedan dañar la bomba de alimentación, las válvulas y los accesorios del arreglo de tuberías.

El tratamiento primario se lleva a cabo en una fosa séptica que permite remover los materiales sólidos no disueltos en el agua residual. La fosa tiene una capacidad de 1.848 m³ y se eliminan aproximadamente del 40 al 60 % de los sólidos sedimentables, además, al ocurrir fenómenos de biodegradación, el porcentaje de remoción de materia orgánica llega a ser del 5 al 15% en DBO₅ (Durán et al., 1998).

El tratamiento biológico se lleva a cabo en el humedal, diseñado para tratar un volumen de 5.6 m³ por día, volumen de agua residual equivalente al generado por aproximadamente 37 personas (Ramírez, 1998).

La alimentación al humedal se realiza continuamente mediante una tubería proveniente de la fosa séptica que conduce el flujo a cuatro distribuidores de flujos equivalentes.

Es importante mencionar que idealmente los humedales artificiales son construidos de tal manera que sean alimentados por gravedad, es decir, sin necesidad de bombeo dado el costo intrínseco del mismo. No obstante, para el presente caso fue necesario contar con una bomba para el suministro de agua residual dadas las dificultades de suministrar el agua por medio de canales de conducción que fluyen por gravedad, ya que a pesar de su existencia no operan de manera regular y dificultan el estudio planteado.

Al final del tratamiento el agua sale del sistema mediante un tubo colector perforado que toma el flujo y lo conduce a una cisterna de almacenamiento.

Todo el tren de tratamiento puede apreciarse en el diagrama de flujo de proceso del humedal (Figura 3.1).

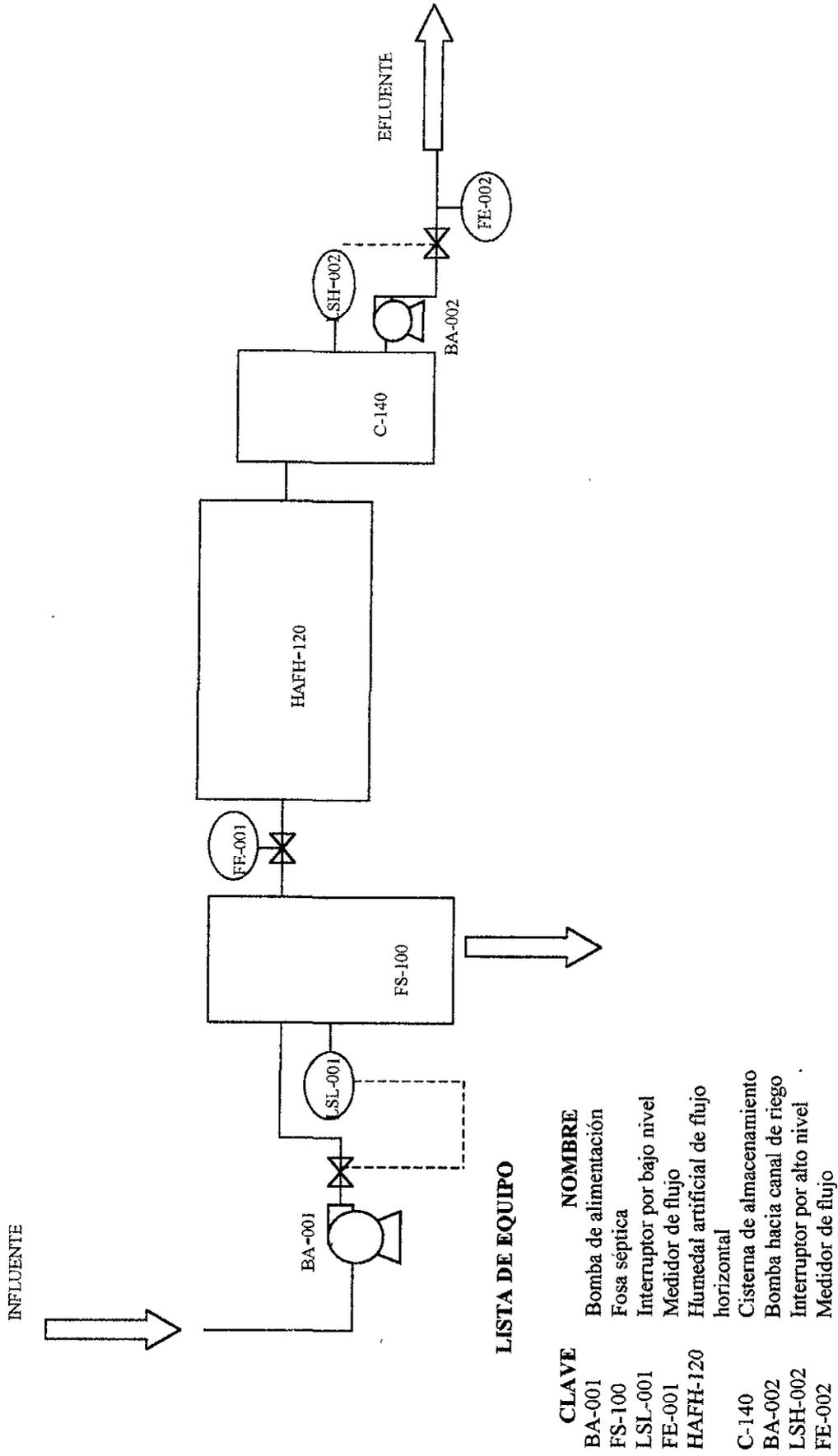


Figura 3.1 Humedal artificial de flujo horizontal, diagrama de flujo de proceso.

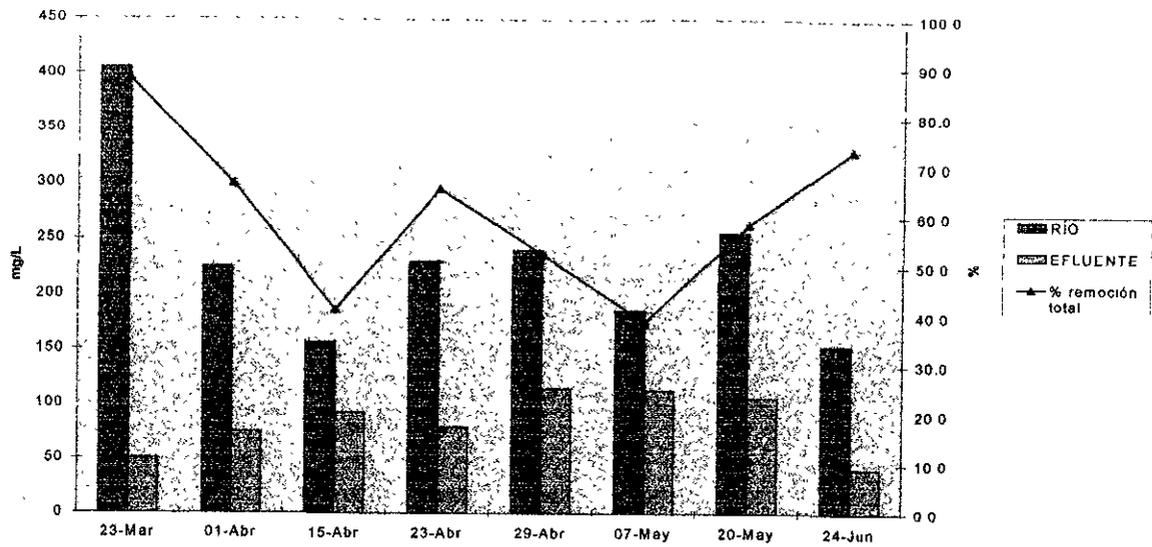
3.5 ANTECEDENTES DE FUNCIONAMIENTO

En las primeras etapas de operación, el sistema remueve los contaminantes presentes en el agua residual de manera física, mediante un fenómeno de filtración-adsorción, que provoca el medio filtrante. Posteriormente, la remoción se mantiene debido a la biotransformación de los contaminantes por efecto del desarrollo de los rizomas de las plantas; las cuales, a su vez propician la no compactación del suelo y promueven el efecto de conductividad hidráulica en el suelo (Luna-Pabello et al., 1997).

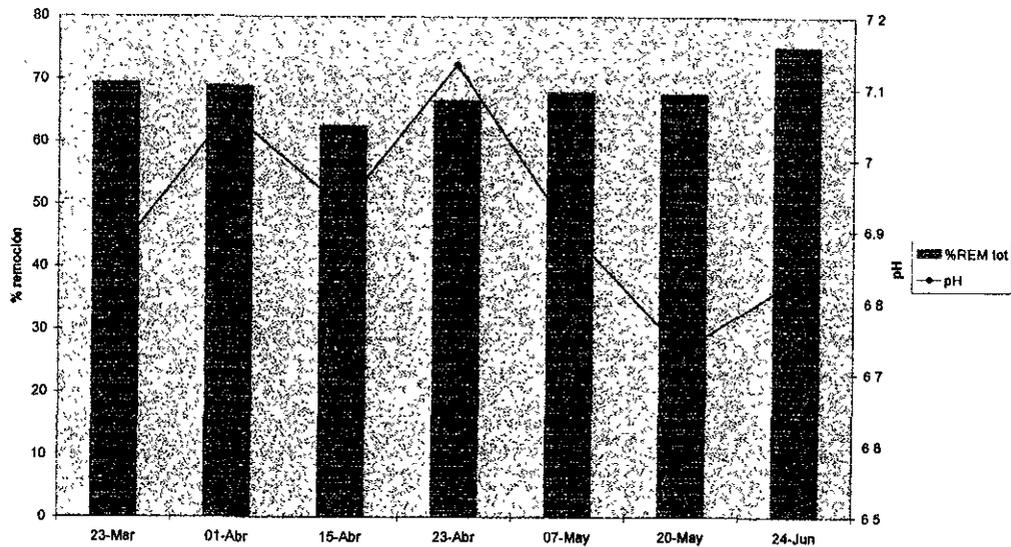
La etapa de arranque es muy importante pues es donde se pueden apreciar problemas operativos derivados de las etapas de diseño y construcción, y se observa el comportamiento depurativo mencionado anteriormente.

La fase preliminar a este estudio, arranque del sistema, estuvo comprendida del mes de marzo al mes de junio de 1998, en el cual se evaluaron parámetros fisicoquímicos para llevar un seguimiento de la depuración del agua en el sistema, la adaptación de las plantas al medio de soporte y a las condiciones del lugar y la primera identificación de las variables y problemas de operación

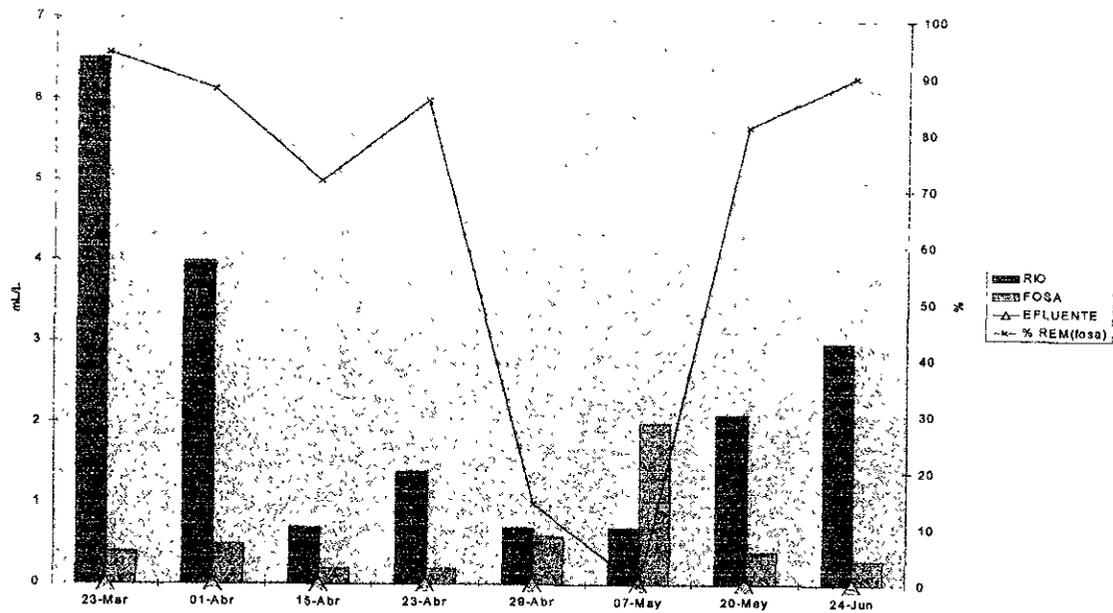
A continuación se muestran en forma gráfica los resultados en esta etapa que servirán de antecedente a la etapa de operación (Jiménez, 1999).



Gráfica 3.1. Concentración de materia orgánica en términos de DBO₅ en el efluente y el influente



Gráfica 3.2. pH y porcentaje de remoción de materia orgánica en términos de la DQO



Gráfica 3.3. Concentración de sólidos sedimentables en el influente, la fosa y el efluente, y porcentaje de remoción al final del tratamiento

En la gráficas 3.1 y 3.2 se presenta la remoción de contaminantes orgánicos medidos como DBO₅ y como DQO y la concentración de contaminantes a la entrada(río) y a la salida (efluente) del sistema.. En un principio se tuvo un porcentaje de remoción alto y luego fue bajando hasta estabilizarse en un rango entre el 70 y 75%. En todo este periodo el pH no presentó grandes variaciones, manteniéndose en un rango de 6.7 a 7.1 unidades.

Con respecto a los sólidos sedimentables, en el tratamiento primario (fosa) se tuvo más del 60% de eliminación y en términos globales, el sistema los elimina en un 100%.

En los valores obtenidos en el muestreo del 7 de mayo se observa una disminución notable en la eliminación de sólidos debida a la saturación del sedimentador por falta de mantenimiento (gráfica 3.3). Cuando el porcentaje de eliminación de sólidos en el tratamiento primario disminuye, es un claro indicio de que se debe realizar el mantenimiento a la fosa séptica y a las tuberías de alimentación al sistema.

Toda esta información es de suma importancia en la etapa operativa, pues con base en los resultados de arranque se pueden ir tomando criterios para el mantenimiento de los equipos

CAPÍTULO 4

CONCEPTOS GENERALES DE OPERACIÓN

CONCEPTOS GENERALES DE OPERACIÓN

4.1 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA OPERACIÓN DEL HUMEDAL

La operación de una planta de proceso se puede definir como el procedimiento a seguir para hacer funcionar correctamente todos los equipos involucrados en ésta; esto implica el conocer las variables de operación y la forma en que se pueden controlar, así como el mantener en forma óptima las unidades de proceso.

Las actividades de operación pueden clasificarse en términos de arranque, rutina y largo plazo. Hay importantes distinciones entre estas; en el arranque como aún no hay una estabilidad, los requerimientos son variables y dan pauta a las actividades de rutina, la cual se puede ver afectada por los detalles de diseño, y la operación a largo plazo es la que ya teniendo al sistema en condiciones de operación “promedio” puede prever situaciones de disturbios o problemas tales como la sobrecarga orgánica (Cooper, P.F., 1996).

Todas estas situaciones se deben de acompañar de un mantenimiento adecuado para maximizar la vida útil del sistema y asegurar una eficiente operación.

Las causas de ineficiencia de operación o de que se encuentren los sistemas fuera de servicio son diversas, y una de ellas es la falta de personal preparado y calificado para la operación y mantenimiento de dichas plantas. Un análisis preliminar de una muestra de 20 plantas indica que el 45% de ellas no opera eficientemente por falta de recursos financieros; en el 30% se debe a errores conceptuales en su diseño y el 25% restante, por falta de capacitación de los operadores (Romero et al., 1996).

4.1.1 Responsables de operación

El personal encargado de manejar una planta de tratamiento requiere de ciertos conocimientos y pericia para que la operación resulte eficiente y se obtenga un efluente de buena calidad. El operador de la planta es frecuentemente el único que tiene una preparación técnica dentro del personal que forma el equipo de trabajo, por lo que estará encargado del muestreo y del control de los procesos. Después de la interpretación de los resultados de las pruebas de laboratorio, el operador debe tomar ciertas decisiones para controlar los procesos de tratamiento. Esta responsabilidad requiere de conocimientos de química y biología, entre otras disciplinas. En el aspecto físico de la planta, el operador debe manejar apropiadamente los equipos, así como darles mantenimiento y reparación. Cuando la planta de tratamiento no trabaja como se espera, el operador debe hacer acopio de todos estos conocimientos y habilidades para identificar la causa del problema y seleccionar la solución adecuada. (Comett et al., 1997).

El operador debe de ser responsable de lo siguiente:

- Conocer los procedimientos propios de operación en el arranque y paro (normales y alternas) de cada una de las unidades de proceso de la planta.
- Conocer el sistema de manejo del mantenimiento de cada unidad de proceso y mantener una bitácora de los requerimientos de las unidades.
- Entender los procedimientos de operación en caso de alguna emergencia.
- Conocer las medidas de seguridad de la planta y aplicarlas.
- Llevar un registro claro y seguro del mantenimiento y la operación de la planta.

Los encargados de la planta o autoridades principales también tienen responsabilidades:

- Mantener un registro completo y preciso de la operación y el mantenimiento de la planta desde su arranque.
- Revisar que las descargas de la planta cumplan con los límites permisibles.
- Proveer el material y equipo necesario a los operadores para su seguridad dentro de la planta.
- Establecer programas de entrenamiento para operadores.

- Realizar inspecciones periódicas y discutir cualquier problema con el operador.

4.1.2 Unidades de proceso, descripción, operación y control del sistema piloto (HAFH)

Para que el operador del sistema piloto realice correctamente sus funciones, es necesario que conozca perfectamente los equipos de proceso, su descripción y funcionamiento, así como las variables de control de cada uno de ellos. Los equipos o unidades de proceso del sistema piloto para llevar a cabo el tratamiento del agua se describen a continuación.

1.- Cribado

a) Descripción General

El agua residual contiene materiales que pueden causar problemas al sistema, materiales sólidos inertes y algunos no biodegradables como pedazos de trapo, lazos y basura que deben ser removidos para prevenir que la bomba o las tuberías se dañen por causa de atascamiento. El proceso de cribado consiste en detener esos materiales mediante una malla de acero que cubre a la bomba en forma de cubo. Sus dimensiones son de 150 cm de altura, 70 cm de largo y 40 cm de ancho, recubierta por una malla plástica con un paso de esfera de 0.5 mm. La malla metálica o jaula-criba se encuentra protegiendo la bomba de alimentación dentro del río que conduce el agua residual, fijada a la pared del cauce. En la figura 4.1 puede apreciarse la zona de suministro de agua cruda que comprende al río Magdalena, a la bomba sumergible, la jaula-criba y la malla plástica protectora. Como se mencionó anteriormente, este tipo de sistemas de tratamiento normalmente son alimentados por gravedad, en consecuencia no requieren de bomba, sin embargo con objeto de contar con un suministro más controlado se optó por instalar el sistema de bombeo.

b) Operación Normal

El cauce del río choca contra la malla lo que hace que reboten los sólidos más grandes y detiene parte de los lodos que contiene el agua, esto evita la entrada de partículas grandes al sistema



Figura 4.1 Zona de suministro de agua cruda procedente del río Magdalena

2. Sedimentador o Tratamiento Primario

a) Descripción General

Consta de una fosa séptica prefabricada a base de fibrocemento reforzado de tipo cilindro vertical de una mampara, con una capacidad nominal de 1.848 m^3 y una capacidad de operación de 1500 m^3 (figura 4.2). El volumen de almacenamiento en la fosa y el tiempo de residencia están controlados por un dispositivo automático, de alto y bajo nivel, que manda la señal de paro y/o arranque a la bomba de alimentación (Ramírez, 1998).

b) Operación Normal

El agua residual es tratada por el proceso de sedimentación para reducir el contenido de sólidos sedimentables, es decir no solubles y suspendidos, para prevenir la formación de bancos de lodo y reducir la DBO en el agua para prepararla para un tratamiento posterior o para disposición final. La gravedad es la fuerza principal que ocasiona la sedimentación pero está influida por las siguientes variables:

- Tamaño y gravedad específica de las partículas, las de gran tamaño sedimentan más rápido.
- Concentración de materiales suspendidos.
- Temperatura, a mayor temperatura es menor la viscosidad del líquido y es más rápida la sedimentación.
- Tiempo de retención, a mayor periodo, mayor es la eficiencia del sedimentador.
- Profundidad, forma y número de mamparas del tanque (Babbit, 1988).

El agua es bombeada hacia la fosa y se introduce a esta a través de una boquilla de 12.6 cm de diámetro cubierta por una malla plástica que detiene parte de los sólidos y evita que se sature rápidamente el sedimentador. El agua permanece en la fosa alrededor de 2 horas y mediante el proceso explicado anteriormente se van al fondo de ésta los sólidos sedimentables; el agua sedimentada pasa por debajo de la mampara y sale por otra boquilla similar a la de entrada.

Se recomienda hacer un análisis periódico de la concentración de sólidos en el agua a la salida del sedimentador, pues servirá complementariamente como criterio para el mantenimiento de la fosa séptica y de la tubería de alimentación.

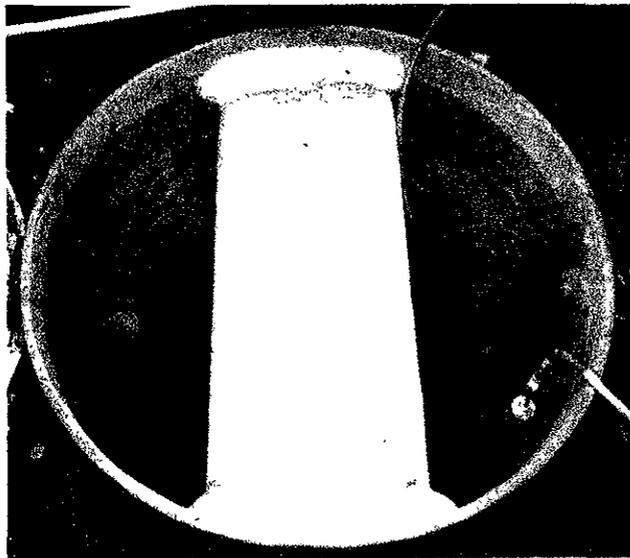


Figura 4.2. Vista superior de la fosa séptica o tanque sedimentador.

3. Zona de alimentación. Medidor de flujo y tubos distribuidores

a) Descripción General

El agua residual alimentada a la planta piloto proviene del río Magdalena y es conducida al sistema de dos formas: la primera es mediante un canal paralelo al sistema de donde el agua llega por gravedad y la segunda es directamente del río con la ayuda de una bomba centrífuga sumergible de 0.4 HP. La alimentación al sistema es de tipo continuo, mediante un distribuidor con cuatro tubos de PVC rígido de 1 ½" de diámetro, repartidos equitativamente a lo ancho del humedal y es controlada mediante un medidor de flujo de tipo desplazamiento positivo y una válvula manual de cierre hermético tipo bola (figuras 4.3 y 4.4).

b) Operación Normal

El agua sedimentada sale de la fosa séptica y fluye por la tubería hacia el medidor de flujo en el cual se tendrá el control del flujo de entrada al sistema. El agua sigue su paso por la tubería por efecto de gravedad y llega a los tubos distribuidores donde se reparte equitativamente en las cuatro salidas que alimentan al humedal.

La salida de los tubos se encuentra aproximadamente a 15-20 cm arriba del lecho con el propósito de oxigenar el agua. El agua no cae directamente al lecho, sino que choca con unas láminas rectangulares de PVC para evitar que el chorro de agua que cae provoque huecos o canalizaciones en un solo lugar en el material de soporte y se altere el patrón de flujo. Para este fin también es importante equilibrar la tubería de distribución para que en cada salida fluya el mismo volumen de alimentación.

La lectura y/o regulación del flujo debe hacerse cada 24 horas y su variación no debe ser mayor al 5% del diseñado.

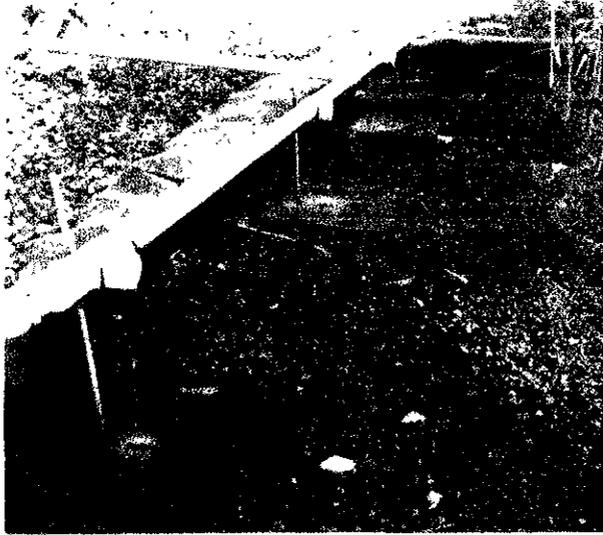


Figura 4.3. Tubos distribuidores que alimentan al humedal el agua proveniente del sedimentador.

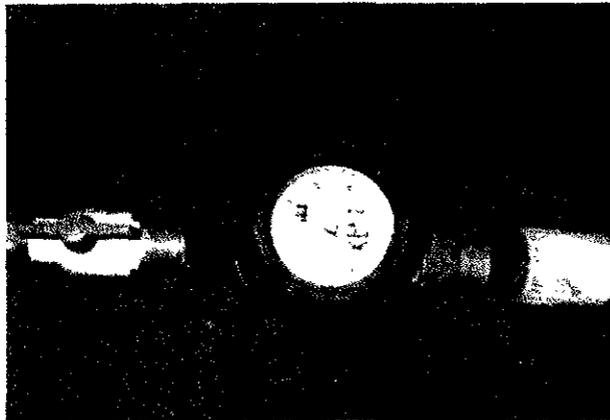


Figura 4.4. Medidor de flujo de alimentación al humedal.

4. Humedal Artificial de Flujo Horizontal

a) Descripción General

Es donde se lleva a cabo el tratamiento biológico y está diseñado para tratar un volumen promedio de 5.6 metros cúbicos diarios, tiene una superficie de 75m² y consta de un lecho de escoria volcánica de diferente tamaño y de plantas vasculares emergentes (figura 4.5). La alimentación es de tipo continuo y el tiempo de residencia hidráulico teórico es de 1.7 días (Ramírez, 1998). En general la descripción del humedal se describe en el capítulo 2.

b) Operación Normal

El principio de operación consiste en que un lecho de raíces de carrizo (*Phragmites sp.*) proporciona una vía o ruta hidráulica a través de la cual fluye el agua a tratar. Esta vía llamada rizosfera, es el espacio anular entre los rizomas, raíces y el suelo circundante. El movimiento de las raíces en crecimiento abre espacio en el lecho, previene la obstrucción de la rizosfera y, por su parte, los carrizos aportan oxígeno atmosférico a través de las hojas, tallos y rizomas de los vegetales. El agua residual se trata así aerobiamente por la actividad bioquímica microbiana en la rizosfera, y anaerobiamente en el material de soporte circundante.



Figura 4.5. Vista general del sistema piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal.

5. Cisterna de almacenamiento

a) Descripción General

Es un depósito subterráneo donde se recoge el agua tratada por el humedal. Sus dimensiones son 1m de cada lado por 2m de alto; en una de las paredes se puede apreciar el nivel, de acuerdo a la altura que alcanza el agua, en una regleta pintada en la cisterna.

En la parte superior derecha se encuentra localizada la “bomba de salida”, está asentada sobre una repisa metálica (figura 4.6).

b) Operación Normal

Al final del tratamiento el agua sale del sistema mediante un tubo colector perforado que toma el flujo y lo conduce a la cisterna de almacenamiento de donde será bombeada para ser utilizada como agua de riego. El agua entra a la cisterna a través de un tubo flexible que además de permitir el flujo de agua residual tratada, hace posible controlar el nivel de agua dentro del humedal para cumplir con el tiempo de residencia hidráulico establecido. Para arrancar el motor de la bomba se tiene un indicador-controlador de nivel que al registrar cierto volumen, manda la señal a la bomba que conduce el agua al canal de riego.



Figura 4.6. Vista superior de la cisterna de almacenamiento de agua tratada.

4.1.3 Variables de operación

Generalmente los humedales artificiales se diseñan de acuerdo a las condiciones locales, la disposición final del agua y las características de ingreso del agua cruda, sin embargo, las variables que se deben controlar en la operación de cualquier tipo de humedal para tratamiento de agua son las que a continuación se describen.

◆ Flujo

El flujo o caudal es una variable muy importante, pues es la que se debe controlar para que el sistema trabaje con la eficiencia esperada de acuerdo al diseño de este. La planta de tratamiento está diseñada para un volumen de 5.6 metros cúbicos; si es operada a un mayor volumen de alimentación, el tiempo de residencia hidráulico tiende a disminuir y la eficiencia depurativa decrece. En caso contrario, si se disminuye el volumen, aumenta la capacidad depurativa, pero esto debe ocurrir luego de un periodo de readaptación de los microorganismos y plantas a estas condiciones (Ramírez, 1998). Existe información reportada, que señala que este tipo de sistemas pueden soportar largos periodos en los que no les sea alimentada agua, esto es posible debido a que los microorganismos y las plantas tienen una alta adaptabilidad a condiciones variables de alimentación, sequía, temperaturas extremas y variaciones de concentración de contaminantes.

Es importante mencionar que para el balance global de agua como influente se considera únicamente el agua residual que está siendo alimentada al sistema a través de la bomba.

◆ Tiempo de residencia hidráulico (TRH)

El tiempo de residencia es un parámetro importante en el sistema pues nos indica el periodo necesario para remover los contaminantes. El valor teórico que se tiene es de 1.8 días

(Ramírez, 1998) y está estimado a partir del flujo de alimentación y del volumen total que contiene el sistema.

Para poder medir experimentalmente este parámetro es necesario hacer el balance hidráulico global y hacer la evaluación de la distribución del tiempo de residencia empleando trazadores inertes. En el capítulo 5 se hablará con mayor amplitud de la forma en que se puede evaluar el TRH.

◆ Infiltración

Está referida al volumen de agua que se propaga fuera de las fronteras del sistema. Cuando esto llega a suceder puede provocar problemas de contaminación en el suelo o en los mantos freáticos localizados en los alrededores de la planta. Asimismo, impide cuantificar correctamente el balance global de agua. Para el control de esta variable se colocó una geomembrana impermeable en la base del lecho para impedir pérdidas de agua; de este modo consideraremos inexistente la infiltración en el sistema.

◆ Evapotranspiración

Este parámetro engloba las pérdidas de agua debido a la evaporación y la transpiración de las plantas y debido a que está influenciada por factores biológicos y climáticos presenta grandes variaciones. La transpiración es un proceso fundamentalmente fisiológico de las plantas, necesario para el metabolismo, que busca un equilibrio entre el agua absorbida por las raíces y la eliminación de la misma a través de los poros en la epidermis de la hoja. La transpiración se encuentra en función de las condiciones ambientales, temperatura, radiación solar, viento y humedad, factores que junto con las características propias de los vegetales como son tamaño, superficie foliar, densidad de poros y edad de la planta, determinan el grado de transpiración (Norero, 1986). Para el control de esta variable, es importante cuantificarla de acuerdo con las condiciones de la zona donde se localiza el sistema.

◆ Precipitación

Este parámetro es importante a considerar como fuente de aportación de agua al sistema. Se ha observado que el fenómeno de precipitación provoca problemas en la aplicación del tiempo de residencia hidráulico requerido, una mayor propagación de las plantas y dilución de los contaminantes contenidos en el agua residual a tratar, pero en general la eficiencia no se ve afectada considerablemente con la presencia de altos valores de precipitación pluvial. El volumen de precipitación pluvial se mide en base a una lámina de agua acumulada en una determinada superficie. Este valor se expresa en milímetros o en centímetros y puede proporcionar información a diferentes intervalos de tiempo.

Es importante instalar un equipo de medición de precipitación pluvial próximo al sistema u obtener datos periódicos que reporte alguna estación metereológica cercana (figura 4.7).

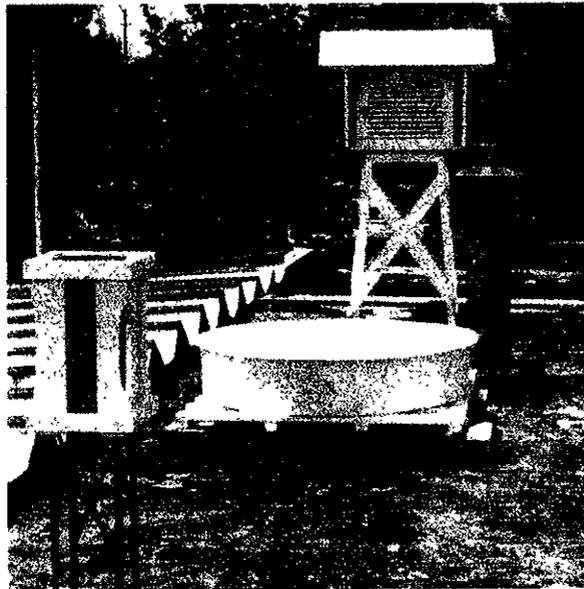


Figura 4.7. La estación metereológica Coyoacán, localizada como a un kilómetro de distancia del humedal.

4.1.4 Condiciones de operación

Dependiendo de la localización geográfica, cambios climáticos, temperatura y precipitación son factores que pueden romper los patrones operativos de los humedales artificiales, ocasionando modificaciones en la operación de los mismos.

Eventos de alta precipitación pluvial traen como consecuencia valores altos de carga hídrica, disminución en la capacidad de almacenamiento y tiempo de residencia insuficiente, así como incremento o decremento de la concentración de contaminantes en el agua de alimentación o influente.

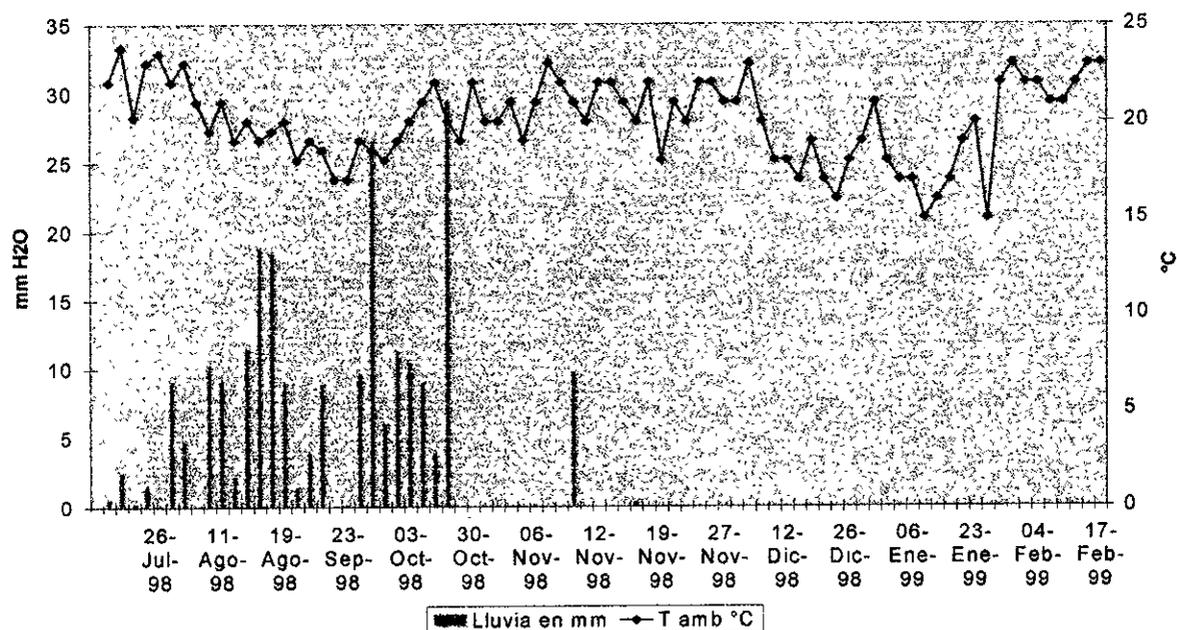
Por tal motivo en el diseño, construcción y operación de los humedales artificiales se debe considerar la interrelación de las funciones de remoción de contaminantes con los cambios climáticos que se presentan en cada estación del año y que influyen en los cambios de temperatura y en el balance global de agua. Es decir, los aspectos térmicos son un factor crítico en el diseño y que tienen efectos de importancia en la eficiencia operativa del sistema.

El humedal estudiado está en una “zona boscosa” dentro de un vivero forestal en donde predomina el clima templado con lluvias en verano y tiene una humedad media. La etapa de operación estudiada estuvo comprendida en el periodo de julio de 1998 a febrero de 1999, tiempo en el cual se presentaron temporadas de fuertes lluvias, bajas de temperatura y días soleados. Todos estos cambios ambientales permiten observar el comportamiento del sistema en cuanto a eficiencia depurativa, crecimiento de vegetales y de población microbiana, pero como sucede en todos los sistemas de este tipo, también se presentan algunos problemas operativos que, en algunos casos, detienen por completo el funcionamiento de la planta y no permiten obtener resultados de forma continua.

El tratamiento principal del agua en el sistema es de tipo biológico y se lleva a cabo en el humedal, los vegetales, el lecho y los microorganismos son los encargados de la depuración del agua, y son los más afectados por los cambios de clima. La temperatura ideal para las

bacterias y microorganismos presentes en el lecho es de 20 grados centígrados aproximadamente, presentándose disminución en la actividad microbiana al bajar ésta (Bonilla y Ramírez. 1993). En otros países es más notable la variación en el tratamiento debido a cambios de clima pues se alcanzan temperaturas bajo cero y llega a haber congelamiento de las capas de agua cercanas a la superficie. En la planta piloto, la eficiencia en el tratamiento no sufrió fuertes alteraciones y se obtuvieron resultados favorables. Esto se debe, en gran parte, a que el clima en México y particularmente en la ciudad de México no es extremo. Las variaciones de temperatura oscilaron entre los 10 y los 24 grados centígrados y aunque fue un año con alta pluviosidad para esta zona de la ciudad, se logró controlar la carga hídrica dentro del humedal.

En la gráfica 4.1 se muestra el perfil de temperatura y precipitación pluvial a lo largo del periodo de operación, apreciándose claramente la temporada de lluvias y de secas.



Gráfica 4.1 Condiciones ambientales en la etapa operativa (julio 98 – febrero 99)

4.1.5 Problemas operativos

Las desviaciones de las condiciones de operación “promedio” pueden suceder con más frecuencia de lo previsto. Los disturbios o perturbaciones generalmente son de dos tipos: (1) aquellos que pueden predecirse y ocurren periódicamente y (2) aquellos que son probables pero que no ocurren con frecuencia y por lo mismo no pueden prevenirse. Los disturbios predecibles pueden ser anticipados durante la puesta en marcha del sistema, ya sea al inicio o en cualquier otro periodo subsecuente siguiente al mantenimiento. Otros problemas predecibles pueden darse de acuerdo con los cambios de estaciones a lo largo del año como son precipitación, temperatura, sequía o estiaje, así como el crecimiento exagerado de vegetación. Los cambios “estacionales” afectan la composición química del influente así como la carga orgánica presente, esto implica un cambio en las rutinas de operación.

Los disturbios o problemas impredecibles tal como su nombre lo indica, involucran cambios no anticipados e imprevistos en la carga orgánica, las condiciones ambientales, daños a la vegetación o la falla de alguna de las unidades de proceso que componen el sistema (Girts y Knigh, 1989).

La presencia de problemas o fallas operativas en el sistema, ya sean predecibles o impredecibles, siempre ocasionan alguna modificación en la operación. Para evitar afectar la eficiencia, estabilidad y capacidad del sistema de tratamiento es necesario que el operador realice acciones encaminadas a solucionar el problema, basándose para ello en: situaciones similares reportadas en otros lugares; consulta bibliográfica; empleando su criterio de manera fundamentada, y, sobre todo, tomando en cuenta el proceso y todo lo que este involucra.

La planta está diseñada para operar los 365 días al año considerando los paros por casos de emergencia y los paros programados para el mantenimiento, pero es necesario que cuando la planta tenga que parar por situaciones de emergencia, la acción de solución se efectúe en forma rápida. De hecho, una ventaja en este tipo de sistemas es la alta tolerancia a excesos o carencias de flujo por periodos prolongados que, si bien afectan la calidad del efluente, no

paralizan completamente su funcionamiento, pudiendo regularizarse el mismo en poco tiempo.

En el capítulo de resultados se presenta una tabla en la que se muestran los problemas operativos que sufrió el sistema en el periodo de julio a febrero de 1999 y la acción efectuada para la solución de los mismos.

4.2.MONITOREO

Considerando que uno de los objetivos principales de este trabajo es elaborar e implementar un programa de monitoreo que facilite la operación y el mantenimiento del sistema, y que permita llevar un seguimiento del comportamiento depurativo del mismo para evaluar la estabilidad y eficiencia del tratamiento, se plantean como puntos principales los siguientes:

- Conocer las variables y condiciones de operación del sistema
- Identificar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos necesarios para integrar un plan que permitan conocer la calidad operativa del sistema, es decir, la eficiencia del tratamiento, todo esto con el fin de evaluar si cumple con los objetivos planteados al inicio del estudio.

Con relación al primer punto, este fue abordado al inicio del presente capítulo; mientras que el segundo punto se desarrollará a continuación junto con aspectos de monitoreo, muestreo y análisis de las corrientes involucradas en el tratamiento sistema.

4.2.1 Parámetros a monitorear

Los parámetros fisicoquímicos y biológicos de interés para el monitoreo del sistema se definen en función de las condiciones locales, los objetivos de diseño y las normas de calidad. Estos parámetros se deben evaluar constantemente durante la operación del sistema, para llevar un seguimiento del comportamiento depurativo y operativo del tratamiento.

4.2.1.1 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros que se listan a continuación son algunos de los más importantes para poder caracterizar una corriente de agua residual y, de este modo, poder evaluar las características del agua cruda que se suministra al sistema, así como las que presentan durante y al final del tratamiento. La descripción detallada del procedimiento a seguir para la determinación de cada parámetro se encuentra en literatura especializada (APHA, 1992).

Demanda química de oxígeno (DQO). Es una medida de toda la materia presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada en un medio ácido por un fuerte oxidante como el permanganato o el dicromato de potasio expuesto a una temperatura entre los 150 y 200 °C durante dos horas. Se mide como miligramos de oxígeno equivalentes a la fracción orgánica disuelta y/o suspendida por litro de solución (agua residual). Como el agua residual alimentada al sistema es en su mayoría de tipo doméstico, presenta una gran cantidad de materia orgánica de tipo química y biológica, misma que debe de ser cuantificada.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Medida indirecta de la cantidad de material biodegradable disuelto y/o suspendido presente en las aguas residuales y se mide como miligramos de oxígeno consumido por los microorganismos que metabolizan la materia disuelta y/o suspendida por litro de solución (agua residual). En el agua a tratar se tiene una gran cantidad de materia orgánica biodegradable proveniente principalmente de desechos orgánicos tales como alimentos en descomposición, orina y heces fecales tanto de humanos como de animales. Por tal motivo este es un parámetro de suma importancia en el programa de monitoreo del sistema. Como el tipo de tratamiento que realiza el humedal es de tipo biológico, implica reacciones de biodegradación llevadas a cabo por colonias de microorganismos, de este modo, es de esperarse que los dos parámetros anteriores se vean reducidos en forma considerable en el agua tratada por el sistema.

Nitrógeno amoniacal (NH_4^+) Todo el nitrógeno existente como ión amonio o en equilibrio se considera como nitrógeno amoniacal y está presente en la orina, desechos fecales y en productos químicos para limpieza, principalmente. Los humedales artificiales llevan a cabo la remoción del ión amonio de acuerdo al ciclo del nitrógeno, en el cual mediante la oxidación se realiza la conversión de los iones de amonio a nitratos mediante el proceso de nitrificación y posteriormente se realiza la desnitrificación para reducir los nitratos a nitrógeno molecular el cual finalmente se volatiliza. Los procesos de nitrificación y desnitrificación se llevan a cabo mediante bacterias bajo condiciones aerobias, anóxicas y anaerobias. Como el destino final del agua tratada es para uso en el riego, requiere que no se elimine por completo el nitrógeno ya que es un nutrimento importante para las plantas.

Fósforo total y ortofosfatos (PT y PO_4^+). El fósforo en el agua residual generalmente se encuentra como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos presentes en los detergentes y otros compuestos. En grandes cantidades produce, junto con los nitratos, efectos de eutroficación debido a que son nutrimentos para los microorganismos fotosintéticos y plantas acuáticas. En el humedal la remoción del fósforo se da por absorción en el medio de soporte en conjunto con el metabolismo de los microorganismos y la precipitación química (Martin, 1995).

Sólidos sedimentables (S sed). Es la materia que queda en el fondo de un recipiente después de sedimentar un litro de solución en un tiempo de 30 minutos, se mide en mililitros por litro. Normalmente existe una gran cantidad de sólidos presentes en el agua residual, no obstante son los sólidos sedimentables los causantes de la formación de lodos que obstruyen las tuberías y ocasionan azolvamiento en el medio de soporte, por esto, constituyen un parámetro muy importante, que además indica la eficiencia en el tanque sedimentador y da la pauta para el mantenimiento del mismo.

Oxígeno disuelto (OD). Es la cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto en el agua y se ve incrementado cuando el agua es sometida a procesos de aireación natural o artificial, situación que se ve favorecida por la actividad fotosintética. La presencia de oxígeno molecular disuelto permite la degradación de compuestos orgánicos biodegradables, dando

4.2.1.2 Monitoreo de la vegetación

Debido a las importantes funciones que tiene la vegetación sembrada en el sistema, se deben incluir en el programa de monitoreo para ver su desarrollo y adaptación, y para asegurar que están trabajando en forma óptima. Los puntos principales a evaluar se muestran en la tabla 4.2 y se explican brevemente para entender la razón por la cual se debe de llevar un control de cada segmento de la planta.

Tabla 4.1. Programa de monitoreo de parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Toma de muestra en el sistema	Frecuencia de colecta	Lugar de análisis
Oxígeno Disuelto	Influyente, Fosa, Lecho, Efluente	Semanal	In-Situ
Temperatura	Influyente, Fosa, Lecho, Efluente	Diaria	In-Situ
Conductividad	Influyente, Efluente	Semanal	In-Situ
PH	Influyente, Efluente	Semanal	In-Situ
DBO ₅	Influyente, Fosa, Efluente	Semanal	Ex-Situ
DQO	Influyente, Fosa, Efluente	Semanal	Ex-Situ
Nutrimientos (P _T , NH ₃ ⁺ , NT)	Influyente, Lecho, Efluente	Semanal	Ex-Situ
Sólidos (Ssed, SDT, STT)	Influyente, Fosa, Efluente	Semanal	Ex-Situ
Metales (Cd, Zn, Cr, Cu, Pb, Fe, Ni)	Influyente, Efluente	Quincenal	Ex-Situ
Bacterias (coliformes fecales y totales)	Influyente, Fosa, Lecho, Efluente	Quincenal	Ex-Situ

Tabla 4.2 Monitoreo de la vegetación

Parte de la planta	Parámetro a monitorear
Tallo	Biomasa, Diámetro
Hojas	Color, Tamaño, Biomasa
Raíces y Rizomas	Tamaño, Longitud /Profundidad
Otros	Transpiración, Propagación

Biomasa. Los carrizos tienen una alta capacidad de captar del agua compuestos de muy diversa estructura, incluyendo algunos altamente tóxicos como el mercurio, el plomo, el cromo y el cadmio incorporándolos a su biomasa, por lo que se debe revisar que no sufra deterioro en su capacidad de seguir aportando oxígeno a la zona de la rizósfera, en caso de que se esté tratando este tipo de contaminantes.

Hojas y tallos. Los metales son concentrados en las partes distales de hojas y tallos, de manera que a medida que la planta crezca y sea podada se podrán eliminar los metales del sistema.

Raíces y rizomas. Por lo general, la maduración de los rizomas de carrizos y tules toman cerca de 3 años en Europa y 1.5 años en México para que el proceso sea completamente funcional (Rivera, 1994), no obstante el periodo requerido puede ser aún menor en México si las condiciones ambientales son favorables.

Transpiración. Para que las plantas crezcan adecuadamente, es necesario que el suelo del lecho permanezca empapado con agua residual la mayor parte del año. Dado que los carrizos maduros llegan a transpirar y evaporar cerca de 1500 mm de agua al año (Rivera, 1994), es indispensable tener un aporte suficiente de agua sobre todo en temporada de estiaje en la que la evapotranspiración es mayor por las altas temperaturas.

Tamaño y propagación. La adaptación de las plantas al sistema depende de las condiciones climatológicas, el material de soporte y la cantidad de nutrimentos contenidos en el agua residual.

Es importante monitorear la vegetación al inicio, en medio y al final del lecho para conocer el comportamiento en los diferentes niveles de tratamiento. En este trabajo solamente se presenta una visión general del monitoreo de la vegetación considerando la altura y propagación de las plantas a lo largo del lecho, así como aspectos relacionados con hojas y tallos

4.2.1.3 Parámetros microbiológicos

Los objetivos que se pretenden lograr en un sistema de monitoreo bacteriológico son los siguientes:

- Conocer el grado de contaminación por organismos indicadores de contaminación fecal o de la presencia de patógenos en las aguas de desechos de origen doméstico o animal.
- Calificar la calidad sanitaria del agua y tener el control de las mismas cuando son sometidas a un previo tratamiento de depuración.
- Fijar las normas de calidad referentes al número de bacterias coliformes totales o fecales permisibles presentes en el agua, dependiendo del uso o usos que se pretenda dar al agua.

La calidad sanitaria del agua y su adaptabilidad a usos generales, con respecto a la presencia de bacterias, se determina por medio de los análisis bacteriológicos rutinarios.

Los estudios bacteriológicos del agua sirven para determinar focos de infección por organismos de importancia para la salud pública así como para establecer procedimientos que permitan descubrirlos, identificarlos y eliminarlos. En general, la microbiología del agua estudia además de esos aspectos, los concernientes a los grupos microbianos naturales de ríos, lagos, pantanos y mares; de gran importancia en las diferentes funciones que tienen lugar en la naturaleza, pues la actividad de estos microorganismos interviene en diversas transformaciones bioquímicas que permiten un equilibrio normal de la vida acuática y cooperan además en varios procesos de remoción de contaminantes en el tratamiento biológico de las aguas residuales.

Por tal motivo, es importante llevar un control o monitoreo de la microbiología del sistema. Por un lado, de los grupos bacterianos, es decir, aquellas colonias de bacterias presentes a lo largo del tratamiento que ayudan a la remoción de contaminantes y, por el otro, de los gérmenes patógenos que se propagan con más frecuencia en el agua y que son causantes de infecciones.

En el lecho del humedal se deben tomar muestras que al observar al microscopio den una idea de los grupos de microorganismos presentes a lo largo del mismo para compararlos con los resultados de remoción de contaminantes y establecer una relación entre estos parámetros. Un claro ejemplo sería la presencia de diatomeas, que son algas que pocas veces forman colonias y que se encuentran en la mayor parte de agua superficial y que producen un olor y sabor desagradables, esto sería indicio de que el agua está contaminada. La presencia de protozoos es una buena señal, pues pocas especies de protozoos son patógenas al hombre y asimilan desechos orgánicos. Los protozoos ciliados se presentan en forma individual o de colonias, pueden ser importantes en la disminución de bacterias, tanto patógenas como de vida libre y de otros organismos vivientes o utilizan carbohidratos o nutrimentos solubilizados en el agua contaminada mediante procesos de biodegradación (Fair, G., 1998).

Los microorganismos de interés sanitario de mayor importancia a considerar en el agua residual que deben medirse son: *Escherichia coli*, *Aerobacter aerógenes*, *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, coliformes fecales y coliformes totales.

En el punto siguiente se describe el mantenimiento del sistema, que es otra de las actividades básicas de operación para que el humedal funcione en forma eficiente y adecuada. Es importante que durante el seguimiento del programa de monitoreo del humedal, éste se complemente con un programa de mantenimiento.

4.3.MANTENIMIENTO

Una de las principales claves del éxito del buen funcionamiento de los humedales artificiales es el mantenimiento, una cualidad importante es que sea sencillo y de bajo costo en comparación con el requerido por otro tipo de sistemas.

El término “mantenimiento” puede definirse, desde el punto de vista de la ingeniería, como el arte de conservar el equipo de la planta y sus estructuras en condiciones apropiadas para llevar a cabo las operaciones o maniobras a las que están destinados (Departamento de Sanidad de Nueva York, 1990).

Existen dos tipos de mantenimiento en una planta de proceso, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. El primero, como su nombre lo indica, está enfocado a revisar y dar servicio a todos los equipos del sistema y dispositivos de control para el buen funcionamiento del mismo, así como para prevenir problemas que afecten la operación.

El mantenimiento correctivo es aquel que se le da al equipo cuando ya existe la presencia de un problema o disturbio que altere las condiciones normales de operación.

Lo más recomendable es que el operador programe un calendario de mantenimiento preventivo para todo el sistema con el fin de evitar, en lo posible, aumentar el costo con mantenimientos correctivos que implican horas hombre trabajadas, servicios, herramientas y equipos.

Los principales aspectos que deben ser considerados en el programa de mantenimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales son el equipo eléctrico, equipo de bombeo, estructuras de la planta, manejo de residuos y seguridad del personal, así como prevención de daños físicos e infecciones corporales.

4.3.1 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo va aunado con las actividades de operación y para llevarlo a cabo se debe de hacer un paro programado del sistema durante el cual se van a realizar

todas las actividades concernientes a la limpieza y servicio de los equipos o unidades de proceso del sistema.

La planta piloto trabaja los 365 días del año y es conveniente programar el mantenimiento general mensualmente o de acuerdo a la actividad requerida. En la tabla 4.3, se presentan las tareas de mantenimiento y operación recomendadas para el humedal artificial.

Tabla 4.3. Tareas de mantenimiento y operación para una planta piloto de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo horizontal.

FRECUENCIA	ACTIVIDAD
DIARIA	Revisión de la operación Distribución adecuada del influente Alimentación adecuada, según los volúmenes e intervalos propuestos
MENSUAL	Revisión y servicio a los dispositivos de bombeo y control Limpieza de fosas o tanques de sedimentación Limpieza de tuberías y mallas de retención de sólidos Limpieza de cisterna de almacenamiento Retiro de vegetación extraña y hojas secas presentes en la superficie del humedal
TRIMESTRAL	Servicio a los dispositivos y equipos mecánicos Cambio de las partes afectadas por abrasión Revisión de los dispositivos de alimentación y drenado Limpieza a los tubos muestreadores ubicados dentro del humedal
ANUAL	Regulación del nivel de agua en el lecho Revisión y poda de la vegetación y retiro de las especies muertas

La planta piloto que se estudió cuenta con dos dispositivos de bombeo, una fosa séptica o tanque sedimentador, dos medidores de flujo, dispositivos de control de nivel en la fosa y en la cisterna de almacenamiento, mallas de retención de sólidos, tubería de alimentación y descarga del efluente, seis tubos muestreadores, dispositivos de regulación de nivel y

carrizos y papiros de pantano soportados en el lecho del humedal, a los que se les debe de dar mantenimiento de acuerdo a lo sugerido en la tabla anterior.

Es importante mencionar que las bombas para aguas negras son parte muy importante del sistema y que debido a que las aguas negras son más difíciles de bombear por la presencia de tierra y arena, se puede presentar un efecto abrasivo sobre las bombas. Por tal motivo es recomendable llevar un riguroso control de inspección y mantenimiento de ellas.

Cabe señalar que se instaló el equipo de bombeo con objeto de garantizar el suministro continuo de agua residual, ya que de otra forma tendría que hacerse por gravedad a través de canales. No obstante la existencia de los mismos, su operación es intermitente y sin periodicidad lo cual impide el adecuado funcionamiento de la planta piloto.

En el anexo 2 se presenta el manual de operación y mantenimiento propuesto para el humedal, en el cual se puede seguir paso a paso las indicaciones específicas para cada dispositivo o componente del sistema.

4.3.2 Mantenimiento de la vegetación

Una ventaja que tienen este tipo de sistemas es que las plantas pueden cosecharse y ser usadas como materia prima para forraje o para elaboración de artesanías, o bien en caso de que esto no proceda, puede elaborarse composta a partir de la mezcla de las mismas con lodos primarios (González y Rosete, 1998). Al llegar a su tamaño definitivo es necesario podarlas con el fin de que, en la temporada siguiente a la cosecha o poda, la población de plantas del humedal tenga mayor eficiencia de remoción de nutrientes, así como de carbono, y de este modo proveer una fuente de energía para importantes reacciones como son la desnitrificación y la reducción de sulfatos (Marsteiner y Collins, 1995).

4.3.3 Manejo de residuos

Todas las plantas de tratamiento generan residuos (sólidos, líquidos y gaseosos) y su eliminación representa casi siempre un reto para los responsables de las plantas de tratamiento, en especial la fracción sólida o “lodo” pues contiene una gran cantidad de microorganismos y materia orgánica insoluble.

Las características biológicas de los lodos son de gran trascendencia para su disposición última ya que pueden ser tanto o más contaminantes que la propia agua residual de donde provienen. Al arrojarlos al suelo, con los fenómenos de lixiviación ocasionados por la lluvia pueden alterarse las características de éste, e incluso, llegar hasta los mantos freáticos y contaminar las aguas más profundas. Sin embargo, existen formas de manejarlos y en ocasiones pueden ser usados como mejoradores de suelos si su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio son adecuados (Durán, 1994).

Los únicos residuos que genera el sistema piloto son lodos que se generan en el tratamiento primario, es decir, son los que se acumulan en el sedimentador o fosa séptica y algunas hojas secas de las plantas que llegan a depositarse sobre el lecho o que son removidas manualmente durante el mantenimiento. Las hojas no presentan ningún tipo de problema en cuanto a su disposición final, pues, pueden ser removidas fácilmente y utilizadas para composta. En el caso de los lodos, sí se requiere una correcta disposición final para que no se conviertan en foco de infecciones. Actualmente, estos lodos se entierran en una fosa cercana al sistema y se les agrega una cantidad de cal para elevar su pH, esto con el objeto de crear un entorno que no favorezca la supervivencia de los microorganismos, y de este modo, mientras se mantenga el pH, no se producen malos olores y no se provocan riesgos para la salud pública, además de que la materia orgánica presente en los lodos puede servir como mejorador del suelo (Metcalf y Eddy, 1996). Es importante que se haga un análisis de la calidad de éstos lodos para hacer una mejor propuesta de tratamiento y disposición final de los mismos.

Otra alternativa es, como se mencionó anteriormente, mezclarlos con el material vegetal cosechado (previo acondicionamiento de los mismos) para elaborar composta, la cual también debe ser evaluada para conocer su calidad fisicoquímica y microbiológica.

4.4 HIDRÁULICA DEL SISTEMA

La hidráulica del humedal comprende al comportamiento que sigue el agua dentro del sistema, es decir la forma en como se conduce el agua desde que entra al lecho y hasta que sale y se deposita en la cisterna de almacenamiento. Entre los factores hidráulicos importantes a considerar en sistemas de áreas inundadas en el tratamiento de aguas residuales se incluyen el hidroperiodo, el patrón de flujo, la tasa de carga hidráulica, el tiempo de retención hidráulica, el tiempo de infiltración y el balance global hídrico.

De todos los anteriores solamente tres son considerados como variables importantes en la parte operativa, el tiempo de retención hidráulico, el patrón de flujo y el balance global hidráulico. En esta sección solamente se habla de los dos primeros y en el siguiente capítulo se presenta la relación de todas las variables operativas que dan lugar al balance global hídrico.

4.4.1 Patrón de flujo

Según las teorías hidráulicas el mejor tipo de flujo es el tapón por la uniformidad de la corriente que se presenta y porque reduce los cortos circuitos (Kadlec, 1995). El problema es que este tipo de flujo difícilmente puede ser alcanzado en la práctica, debido a que la corriente no es del todo constante ni uniforme. Sin embargo, aunque el flujo tapón no es la mejor aproximación, tampoco lo es el flujo completamente mezclado.

El tipo de flujo puede ser controlado por la altura del efluente en la salida del lecho, buscando conseguir una corriente anular o tapón.

Los requerimientos para mantener un patrón de flujo son:

- Mantener el flujo de alimentación constante y uniforme.
- No se deben formar montículos o remolinos en la sección superficial del lecho cuando el sistema reciba un flujo máximo.
- El flujo no debe depositarse en la parte inferior del lecho cuando reciba un flujo mínimo.

- La profundidad de la raíz en el sistema debe ser lo más uniforme posible.

La hidrodinámica de los procesos que intervienen en la depuración del agua es afectada por cortos circuitos hidráulicos y la intensidad de mezclado, lo que llega a producir un volumen no activo dentro del sistema denominado zona muerta (Morgan-Sagastume et al., 1997). Es posible suponer la existencia de dos tipos de zonas muertas dentro del sistema: aquellas ocasionadas por canalizaciones o cortos circuitos hidráulicos y las provocadas por fluido estancado. Las zonas muertas con agua estancada se encuentran en los huecos de material poroso, en esquinas del reactor y/o en pequeños huecos de la biopelícula donde las corrientes del fluido no pueden penetrar.

Para la determinación del patrón de flujo y para la cuantificación de zonas muertas es común realizar estudios con trazadores que, mediante el análisis de la curva de distribución de tiempos de residencia experimental, permiten obtener dicha información (Smith, 1993).

4.4.2 Tiempo de residencia hidráulico

El tiempo de residencia hidráulico (TRH) es el tiempo que permanece el agua a tratar dentro del sistema depurador y se establece en función del tiempo considerado como necesario para remover los contaminantes y la materia orgánica presente en el agua residual. Si la alimentación es de tipo continuo, como en el caso de nuestra planta piloto, la ecuación que lo define es la siguiente:

$$\text{TRH(d)} = \text{volumen total alojado(m}^3\text{)} / \text{flujo volumétrico (m}^3\text{/d)}$$

Como el humedal se puede considerar como un reactor empacado, el volumen alojado está en función de las dimensiones del mismo y de la porosidad del material de empaque.

De este modo $\text{TRH} = l \cdot a \cdot n \cdot h / F_v$

Donde l (largo) = 15m

h (profundidad) = 0.6m

a (ancho) = 5m

F_v (flujo volumétrico) = $5.6\text{m}^3/\text{d}$

n (porosidad) = 0.48

El TRH teórico calculado es de 1.8 días (Ramírez, 1998), pero es necesario calcular el experimental. El tiempo de residencia también se puede definir como el tiempo que transcurre para que una molécula pase por un reactor (Smith, 1993).

Las propiedades que se deben considerar para conocer el TRH son el tiempo transcurrido desde que la primera molécula de agua entró al reactor y el resto de tiempo que estará en él, la suma de estos dos es el TRH y se puede obtener la distribución de residencia de tiempo real en base a datos experimentales de respuesta.

En el capítulo 5 se presenta el experimento realizado con un reactor a escala laboratorio para poder comprender mejor el comportamiento hidráulico del humedal artificial construido en los Viveros Forestales de Coyoacán.

4.5 EFICIENCIA Y ESTABILIDAD

La eficiencia de los humedales artificiales teóricamente se basa en el tiempo de residencia del sistema tomando en cuenta el volumen contenido en el lecho y la razón de flujo. En realidad la eficiencia si está en función del tiempo de residencia, pero también depende de la ocurrencia, duración y contacto entre los contaminantes y la población de microorganismos.

Esta eficiencia se puede apreciar en los porcentajes de remoción de los diferentes contaminantes y tiene que ir de acuerdo a las diferentes etapas del sistema. En otras palabras, la eficiencia irá en aumento cuando las colonias de microorganismos estén completamente establecidas, las plantas vasculares alcancen su tamaño definitivo y se tenga un patrón de flujo establecido, así como el conocimiento del balance global del sistema, lo cual usualmente tarda aproximadamente un año después de iniciar su operación.

Para poder evaluar la eficiencia es necesario realizar periódicamente un análisis del agua residual antes y después de entrar al sistema de tratamiento y llevar un registro de todos los datos.

La estabilidad del sistema se puede definir en términos de continuidad de operación, es decir, de mantener las condiciones establecidas en cuanto al flujo, tiempo de residencia y a mantener un porcentaje de remoción promedio que no presente altibajos.

En el capítulo 7, relativo a análisis de resultados, se evalúa la eficiencia y la estabilidad que alcanzó el humedal en la etapa de operación estudiada.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE INTERÉS

MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE INTERÉS

5.1 Medición de las variables operativas

En el capítulo anterior se hace mención de todas las variables relacionadas con la operación del humedal, todas esas variables están relacionadas entre sí para llegar a lo que son las condiciones reales de operación. Parte muy importante de dichas condiciones es la determinación del balance global de agua, es decir, la cuantificación de la cantidad de agua que entra y sale del sistema. Esto para cotejar si están de acuerdo con el diseño y con los valores recomendados para la carga hidráulica y el tiempo de retención hidráulica. Los parámetros considerados para formular el balance son: el influente de agua residual; la contribución por el agua de lluvias; la infiltración neta; el efluente y la pérdida causada por la evapotranspiración. Para el balance hay que tomar en cuenta las condiciones climatológicas del lugar donde se ubica el sistema dado que la humedad relativa; la incidencia solar; la temperatura y el viento son variables que condicionan los parámetros antes mencionados.

La medición de las variables relacionadas con el balance se hizo de la siguiente manera:

Influente o Flujo de entrada al sistema (fvi). El sistema cuenta con un medidor de flujo que está situado a la salida de la fosa séptica, es un medidor de desplazamiento positivo modelo MD-25 de 1 pulgada de diámetro con cuerpo de bronce y con un caudal máximo de 400 LPH. El medidor es de tipo directo y mide flujo instantáneo y acumulado; al pasar el agua por el medidor hace girar una manecilla que indica los litros que están fluyendo y es en ese momento cuando se toma la lectura con la ayuda de un cronómetro y en la carátula totaliza el flujo que ha sido alimentado. Para corroborar esta lectura se toma también el flujo en cada uno de los cuatro distribuidores, midiendo un volumen conocido a un determinado intervalo de tiempo.

Volumen de precipitación (P). La cantidad de agua que entra al sistema a causa de la precipitación pluvial se mide en base a una lámina de agua acumulada en una determinada superficie o recipiente graduado, por ejemplo una probeta. En la planta piloto, el agua se colectó en un recipiente instalado dentro del sistema y diariamente se midió la cantidad acumulada, el valor fue expresado en mm de agua para posteriormente llevarlo a una unidad de volumen en función del área del humedal (figura 5.1). Este valor se corroboró con la información proporcionada por la estación metereológica Coyoacán.

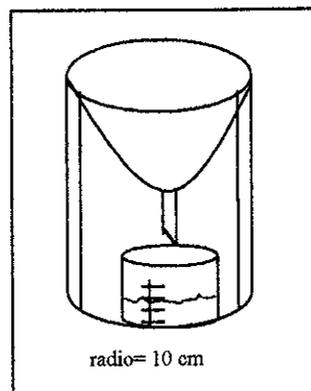


Figura 5.1. Esquema del pluviómetro experimental que se construyó para medir el volumen de precipitación en el humedal.

Infiltración (I). Como el sistema está protegido con una geomembrana para evitar infiltraciones al subsuelo, se considera que no hay pérdida de agua por este conducto.

Efluente o Flujo volumétrico de salida (fve). Esta variable también es medida con un medidor de flujo de tipo desplazamiento positivo, marca Azteca, 3VM, clase “B”, $\Delta P = 1$ bar, el cual se localiza después de la cisterna. Este dato también lo comprobamos midiendo el flujo que sale del tubo colector como un volumen conocido a cierto intervalo de tiempo.

Acumulación (dV/dT). Se considera que la cantidad de agua acumulable en el sistema es despreciable en términos de un balance de agua macroscópico, por lo que se toma como cero (Ramírez, 1998).

Evapotranspiración (ET). La evapotranspiración se puede estimar conociendo la profundidad y duración de la inundación. Para tener una aproximación del agua que se pierde por la evaporación y la transpiración de las plantas, se construyó un pequeño sistema de 0.49 m^2 de área con una profundidad de 0.3 m (figura 5.2), en el que se plantaron carrizos y se llenó con agua residual. Para saber el nivel de inundación se le instaló un tubo perforado por donde puede pasar el agua y diariamente se medía el nivel. Cabe mencionar que este mini-humedal se construyó en el mismo sitio donde se ubica la planta piloto para tener las mismas condiciones ambientales y se protegió de la lluvia. El dato obtenido de la disminución de nivel también se escaló al área del sistema piloto.

En el periodo donde el sistema estuvo detenido a causa de problemas operativos impredecibles también se pudo medir la pérdida de agua por evapotranspiración; el sistema se dejó a máximo nivel de inundación y no se alimentó ni se sacó agua de modo que introduciendo una regleta en uno de los tubos muestreadores ubicados dentro del humedal se registró el nivel de agua por algunos días y se asumió que la pérdida de nivel correspondía a el agua perdida por evapotranspiración y se comparó con el resultado del experimento arriba mencionado.

Cabe señalar que en ese periodo no hubo presencia de lluvias que alteraran los resultados.



Figura 5.2. Sistema a escala experimental, con carrizos y escoria volcánica, construido para medir la evapotranspiración.

5.1.1 Evaluación del balance global de agua

En el balance global de agua se hace una cuantificación de todas las aportaciones de agua al sistema y de las pérdidas o salidas de agua existente de acuerdo a la relación siguiente:

$$dV/dT = (fvi + P) - (fve + ET + I)$$

Donde:

dV/dT = volumen de acumulación en el sistema, (adimensional)

fvi = flujo volumétrico que entra al sistema, (m^3/d)

P = Volumen de precipitación diaria, (m^3/d)

fve = flujo volumétrico de salida, (m^3/d)

ET = volumen perdido por evapotranspiración, (m^3/d)

I = volumen de infiltración, (m^3/d)

De acuerdo a lo anterior las únicas variables realmente involucradas en el balance y que afectaron la relación influente-efluente fueron la evapotranspiración y la precipitación.

El balance global se presenta en el capítulo de resultados y la tabla de los datos de medición de cada variable en el anexo 2.

5.2 Caracterización fisicoquímica

Para determinar el comportamiento depurativo del sistema se realizó el programa de monitoreo descrito en el capítulo 4 con tres puntos de muestreo, el agua residual cruda o influente (río), el agua después de sedimentación (fosa), y el agua al final del tratamiento (efluente). Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron DBO_5 , DQO, sólidos sedimentables, pH, T, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, ortofosfatos y fósforo total.

Los análisis se realizaron en campo y en el laboratorio 301 del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM.

Las técnicas utilizadas para el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos están referidas en el manual “Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual” (APHA, 1992).

La remoción de materia orgánica se presenta en términos de la demanda bioquímica de oxígeno, DBO_5 y de la demanda química de oxígeno, DQO, con la concentración en mg/L encontrada a la entrada y a la salida del sistema.

El fósforo total, P_{TOT} , se cuantificó mediante una reacción de digestión con ácido nítrico en la cual se reduce la materia orgánica y se libera al fósforo en forma de ortofosfato (PO_4) para ser analizado fotométricamente usando reactivos de Vanadio-Molibdato. El nitrógeno amoniacal se detectó con método fotométrico utilizando el reactivo de Nessler.

Se tomaron muestras compuestas en todos los puntos de muestreo para asegurar que las muestras fueran representativas. Las muestras compuestas se conformaron de 3 muestras simples con un volumen de 1 litro cada una y se tomaron de acuerdo a la normatividad vigente (NOM-001-ECOL, 1996). Los muestreos se hicieron considerando un tiempo de residencia teórico de 1.8 días (Ramírez, 1998).

5.2.1 Programa de muestreo

La etapa de muestreo es muy importante pues el muestreo bien dirigido y confiable, asegura la validez de los resultados analíticos. Además, el muestreo frecuente permite establecer los valores medios y su variación, así como el grado de fluctuación de la calidad del agua. Para este fin, las muestras deberán representar verdaderamente a la masa de agua o aguas residuales de las que se toman, y no debe haber cambios significativos en las muestras tomadas, entre los tiempos de muestreo y análisis (Fair, 1998). Las muestras tomadas al azar pueden proporcionar información incompleta y errónea. Las observaciones meteorológicas e hidrológicas, incluyendo temperatura, registros de tormentas, escurrimientos, sequías e inundaciones pueden aportar información importante ya que influyen en la concentración o dilución de contaminantes en el agua residual. Asimismo, son importantes las temperaturas del aire y del agua.

En esta etapa no solamente es importante la toma de la muestra, para lo cual se debe seguir lo indicado en la NMX-AA-003 Aguas residuales - muestreo, sino también la conservación de la misma así que se siguieron algunas recomendaciones de la APHA (American Public Health Association) contenidas en la siguiente lista y en la tabla 5.1.

Al tomar la muestra

- Lavar el envase 2 o 3 veces con el agua que se va a recoger.
- De preferencia contar con envases de boca ancha.
- Si la muestra se va a transportar, se debe dejar un espacio del 1% de la capacidad del envase para permitir expansión térmica
- Tomar muestras representativas, de preferencia muestras compuestas.
- Si la muestra va a ser tomada de tuberías, se debe dejar correr el agua por la tubería hasta que haya un flujo uniforme, considerando el diámetro y longitud del tubo y la velocidad del fluido.

Después de tomarla

- No se debe poner la muestra al sol
- Se debe etiquetar inmediatamente indicando la siguiente información:

- Número de muestra
- Fecha
- Momento y lugar de la toma
- Nombre de quien la tomó.

Para tener un buen control en esta etapa es recomendable el uso de una bitácora o libro de registro de muestras donde se especifique la siguiente información:

- Objeto de la toma.
- Localización del punto donde se hizo la toma.
- Indicar de que proceso vienen.
- Tipo de muestra (simple o compuesta)
- Número y volumen de muestras tomadas
- Condiciones del lugar donde se tomó la muestra.
- Nombre de la persona que realizó la toma.

Tabla 5.1 Recomendaciones para toma y conservación de muestras (APHA, 1992)

PARÁMETRO A ANALIZAR	TIPO DE ENVASE	TOMA MÍNIMA DE MUESTRA (mL)	CONSERVACIÓN	TIEMPO MÁX. DE CONSERVACIÓN RECOMENDADO/ OBLIGADO
DBO	Plástico, Vidrio	1,000	Refrigerar	6h / 48h
DQO	Plástico, Vidrio	100	Analizar inmediatamente o añadir H ₂ SO ₄ hasta pH menor a 2, refrigerar	7d / 28d
NO ₃ ⁻ (NITRATO)	Plástico, Vidrio	100	Analizar lo antes posible, refrigerar	48 h
NH ₄ ⁺ (AMONIO)	Plástico, Vidrio	500	Refrigerar, añadir H ₂ SO ₄ hasta pH menor a 2	7d / 28d
pH	Plástico, Vidrio	N.A.	Analizar inmediatamente	2h / inmediatamente.
SÓLIDOS	Plástico, Vidrio	N.A.	Refrigerar	7d / 2-7
OLOR	Vidrio	500	Analizar inmediatamente	6h / inmediatamente

5.3 Estudios preliminares de la hidráulica del sistema

En esta sección se hace un recuento de las bases para medir experimentalmente el patrón de flujo y el tiempo de residencia hidráulico en el humedal. La propuesta es a través de un experimento de respuesta con trazadores inertes que se basa en la función de distribución de tiempos de residencia utilizada en reactores empacados.

La definición más conveniente de la función de distribución de tiempos de residencia es la fracción $J(\theta)$ de la corriente efluente que tiene un tiempo de residencia inferior a θ , donde θ es igual a TRH. Ninguna parte del fluido puede haber pasado por el reactor en un tiempo cero, por lo que cuando $\theta=0$, $J=0$. Análogamente, ninguna parte del fluido puede permanecer indefinidamente en el reactor, por lo que J tiende a 1 a medida que θ tiende a infinito.

Suponiendo que la densidad de cada elemento permanece constante durante su paso por el reactor, el tiempo de residencia, promediado para todos los elementos del fluido queda:

$$\theta = V/Q$$

Q = flujo volumétrico

V = volumen del reactor

La distribución de tiempo de residencia de un determinado reactor y una cierta velocidad de flujo puede establecerse a partir de experimentos de respuesta. En estos experimentos se perturba la concentración de un trazador inerte en la corriente de alimentación y se mide su efecto con la corriente efluente. Las tres perturbaciones o variaciones más comunes son una función escalonada, una pulsación (onda cuadrada) y una onda sinusoidal. Esto se puede apreciar analizando las relaciones entre las curvas de tiempo-concentración.

La función distribución de tiempo de residencia $J(\theta)$ quedaría expresada como:

$J(\theta) = \text{cantidad de trazador descargada en tiempo } t / \text{cantidad de trazador alimentada en tiempo } t.$
--

En la mayoría de las curvas de distribución de tiempos de residencia será posible observar dos regiones; una de tipo Gaussiana y otra con decaimiento exponencial (cola hidráulica). En el caso de sistemas con zonas estancadas aparecerá una tercera región correspondiente a una cola más pronunciada (Figura 5.4). La región de tipo Gaussiana (distribución normal) se presenta al inicio de la curva y es simétrica respecto al punto máximo de la misma. La región de decaimiento exponencial (cola hidráulica) se encuentra en la parte final de la curva (en el caso de existir zonas estancadas sería la región media) al tener como punto de partida el máximo de la misma.

Una curva Gaussiana indicará una tendencia a flujo pistón mientras que una curva descrita mediante decaimiento exponencial será indicio de una tendencia a flujo totalmente mezclado. Una curva con la mezcla de ambos comportamientos, como es el caso de las curvas obtenidas en el experimento que se presenta a continuación, implica la combinación de los sistemas ideales para la descripción del flujo real del sistema.

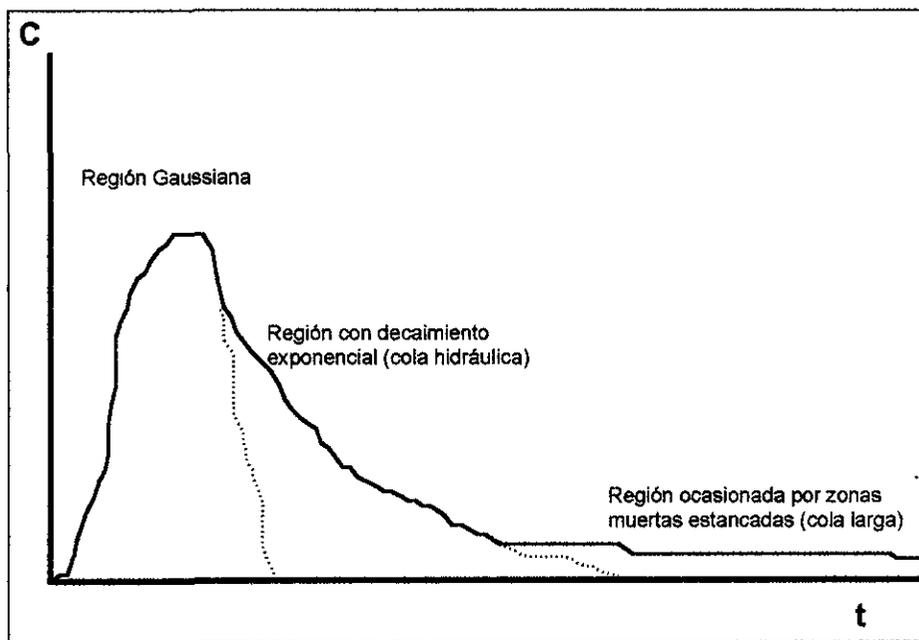


Figura 5.4. Partes de la curva de distribución de tiempos de residencia

5.3.2 Determinación del patrón de flujo en un reactor empacado con escoria volcánica

El objetivo de este experimento es evaluar el comportamiento hidráulico en un reactor a escala de laboratorio, empacado con escoria volcánica y con características similares a las del humedal artificial de flujo horizontal construido en el vivero forestal de Coyoacán.

Este tipo de estudios a nivel laboratorio, permite una mejor comprensión de lo que ocurre en el sistema piloto.

Materiales y métodos

Para construir un reactor a escala laboratorio, se utilizó un recipiente rectangular de acrílico, con 0.395 m de ancho, 0.99 m de largo y 0.395 m de alto, dando un volumen de 154.4 L. En las partes de inicio y fin del reactor, se empacó con escoria volcánica de 8 a 16mm y en la sección media con material de 4 a 8 mm. El volumen del agua en el tanque al estar éste empacado, fue de 74.14 L. El material de empaque ocupó el 48% del volumen total del reactor. El sistema fue operado durante 5 días con un flujo de alimentación continuo de 20 mL/min y el agua fue suministrada por medio de una bomba peristáltica Cole Palmer con dos cabezales No.18.

El trazador seleccionado fue el cloruro de litio, pero no fue posible conseguirlo a tiempo, por lo que en vez de medir la concentración del trazador en lapsos de tiempo, se midió la conductividad eléctrica de una sal agregada (cloruro de sodio) al agua de alimentación.

Para encontrar la concentración adecuada se hicieron pruebas de conductividad del agua sola, así como con el material de empaque y con diferentes concentraciones de cloruro de sodio (tabla 5.2).

Tabla 5.2 Pruebas de conductividad para elegir la concentración de NaCl como trazador a utilizar en el reactor experimental.

Solución	Conductividad ($\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$)
Agua destilada	0
Agua de la llave	300
Solución de NaCl al 10% en agua destilada	>7500
Solución de NaCl al 10% en agua de la llave	>7500
Agua destilada con escoria volcánica	100
Agua de la llave con escoria volcánica	400
Solución de 2g de sal en 1000 mL de agua destilada.	5200
Solución de 1.25g de sal en 1000 mL de agua de la llave	2400

La concentración de la solución salina fue de 1.25g de sal por cada litro de agua de la llave, con una conductividad inicial C_0 de 2, 400 $\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$. La solución salina fue inyectada con una jeringa de 10ml en la manguera de alimentación al reactor.

Se llevaron a cabo tomas periódicas de muestras a la entrada del influente, en tres zonas de monitoreo intermedias y a la salida del efluente del reactor, con la finalidad de determinar que el patrón de flujo se mantuviera a lo largo de todo el sistema. Adicionalmente se tomaron muestras cerca de la pared del reactor y en la parte superficial para ubicar zonas muertas. El agua del efluente fue recolectada en un pequeño tanque de 19L localizado a la final del mismo. La conductividad se midió en un conductímetro previamente calibrado en un rango de 0 a 7500 $\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$.

Con la obtención de los datos se elaboraron las curvas de conductividad contra tiempo para determinar el patrón de flujo y la detección de zonas muertas en el reactor, situación que pudiera ser similar en la planta piloto.

En la figura siguiente se aprecia la metodología experimental que se siguió con el reactor.

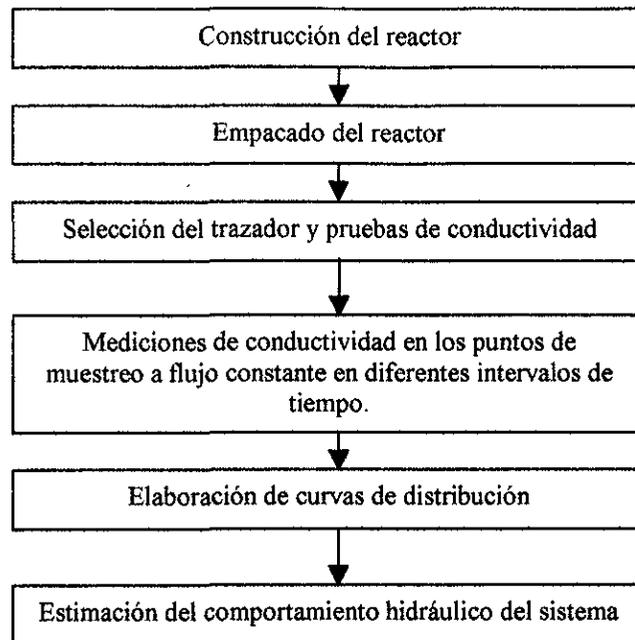


Figura 5.5. Diagrama del manejo experimental efectuado con el reactor empacado.

Resultados y discusión

El reactor estuvo operando durante 5 días en los cuales se tomaron muestras en cada uno de los puntos de muestreo y en el efluente. En la tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos.

Analizando el comportamiento hidráulico que siguió la solución salina en el reactor a lo largo del experimento podemos decir que la curva de distribución de tiempo de residencia (gráficas 5.1 y 5.2) muestra que el sistema tiende a flujo pistón con dispersión axial.

Esto se puede apreciar mejor al graficar solamente la conductividad en el efluente pues se observa claramente una curva Gaussiana que indica la tendencia a flujo pistón y la región de decaimiento exponencial o cola hidráulica al final de la curva, pero no se aprecia una cola larga que indique la presencia de zonas estancadas o muertas.

Tabla 5.3 Resultados obtenidos en las muestras tomadas en los puntos de muestreo del reactor operando a flujo continuo.

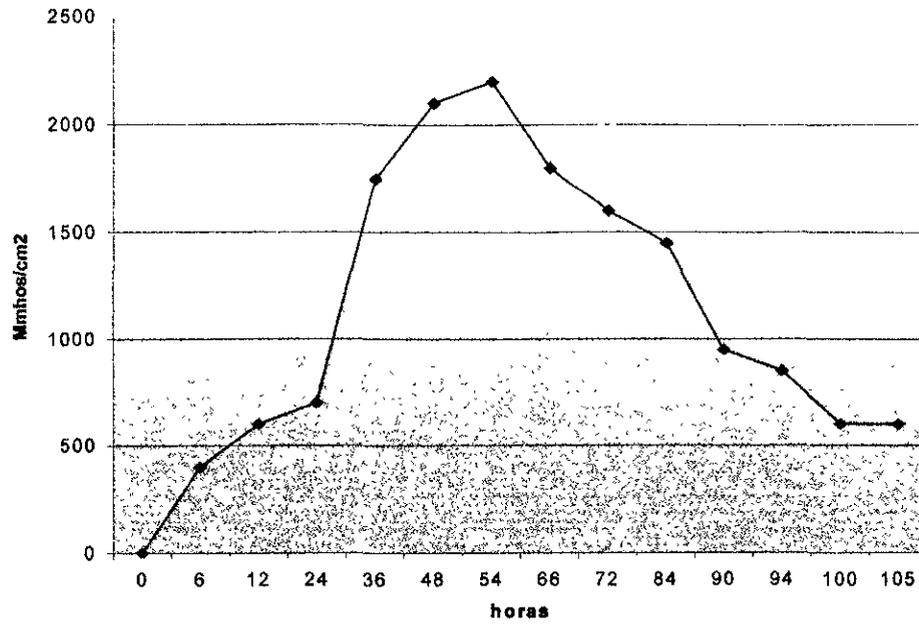
Tiempo (horas)	Conductividad $\mu\text{mhos/cm}$					
	muest 1	muest 2	muest 3	superficie	pared	efluente
0	0	0	0	0	0	0
6	1150	950	700	450	400	400
12	1250	1000	800	600	550	600
24	1100	900	600	500	700	700
36	1200	1000	850	750	700	1750
48	1200	800	1100	900	800	2100
54	2100	1950	1750	1500	1100	2200
66	1500	1450	1500	1500	1550	1800
72	1350	1250	1350	1250	1350	1600
84	1100	950	850	1100	1150	1450

Para comprobar esta tendencia se graficaron los resultados obtenidos en los diferentes puntos de muestreo encontrando que en los muestreadores 1, 2 y 3 la tendencia es hacia flujo pistón, pues aunque no se alcanza a terminar la curva, parece que sube, alcanza un punto máximo y decae rápidamente.

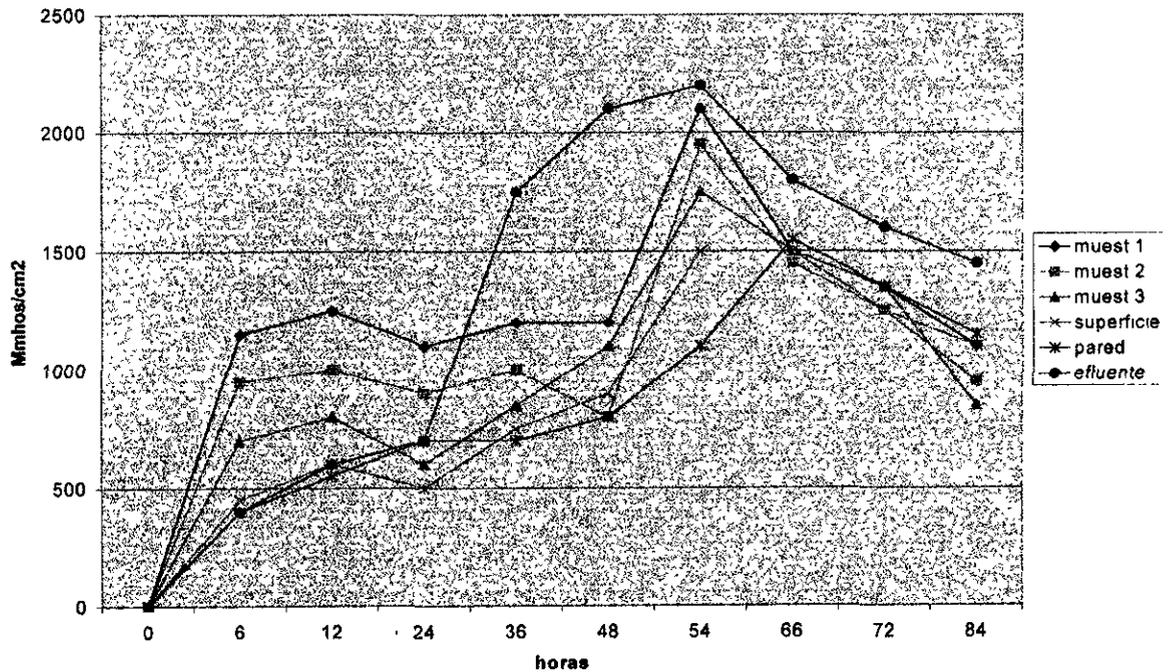
En el caso de la parte superficial y la pared del reactor, las concentraciones fueron más bajas que en todos los demás, situación que puede deberse a que haya algún corto circuito hidráulico que no permita al trazador llegar hasta esos puntos o exista estancamiento en algunas zonas que estén representadas por la zona de decaimiento en medio de la curva de distribución.

El tiempo de residencia hidráulico no se determinó con la exactitud deseada, pero en la gráfica se puede ver que la concentración máxima del trazador en el efluente, cuando el flujo y la concentración en la descarga casi igualaron a los de alimentación, se alcanzó en 54 horas, es decir, en 2.25 días.

El TRH teórico de acuerdo a la ecuación anteriormente descrita, sería de 2.57 días.



Gráfica 5.1. Curva de distribución de tiempo de residencia experimental en el reactor empacado



Gráfica 5.2. Conductividad del cloruro de sodio vs tiempo en los puntos de muestreo del reactor empacado

Se constató que el comportamiento hidráulico del reactor experimental tiene una tendencia a flujo pistón con presencia de algunas zonas estancadas principalmente en las paredes del reactor y en la zona superficial.

Se obtuvieron resultados que pueden servir como criterios para suponer que el comportamiento hidráulico del humedal artificial de flujo horizontal, ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán, sea similar al del reactor experimental.

Se recomienda el mismo procedimiento experimental en un sistema con plantas y microorganismos ya adaptados para observar la influencia de la zona de la raíz en la hidráulica del mismo.

Se propone que en vez de solución salina de cloruro de sodio, se utilice el cloruro de litio (LiCl) como trazador pues es de los más utilizados en este tipo de sistemas, ya que es completamente inerte y no causa daño a las plantas y poblaciones bacterianas, además de que es eliminado por completo del medio de soporte (Netter, 1992), o alguno de los que se proponen en la tabla 5.4.

Finalmente, se debe realizar el experimento en el humedal y calcular el tiempo de residencia real con algún método numérico con el que se obtenga el área bajo la curva que representa el TRH.

Tabla 5.4 Trazadores inertes para experimentos de respuesta en reactores empacados

Trazador	límite de detección	técnica de detección
LiCl	0.5 ppm	abs. Atómica
NaBr	0.1 ppm	Cromatografía
Eosin-Y	0.03 ppb	Espectrofluorometría
Verde de bromocresol	N.C.	Espectrofotometría a 610 nm
Azul Dextran 2000	N.C.	Espectrofotometría a 220 nm

N.C. No considerado

La metodología a seguir para llevar a cabo el experimento en el humedal sería la siguiente:

1. Después de seleccionar el trazador, se debe hacer la curva de calibración con una solución de concentración conocida de Litio.
2. Identificar los puntos de muestreo en el sistema: Se sugiere que estén ubicados en las capas superior, media e inferior del sistema y distribuidos a lo largo de éste para poder observar un patrón de flujo en cada zona (Marsteiner, 1996) y la presencia de zonas muertas y cortos circuitos (ver figura 5.6).
3. Mezclar una solución de concentración conocida del trazador a la entrada del sistema y tomar muestras en periodos de tiempo definidos.
4. La toma de muestras se hará con una pipeta en la zona superior y con mangueras en las zonas media e inferior.

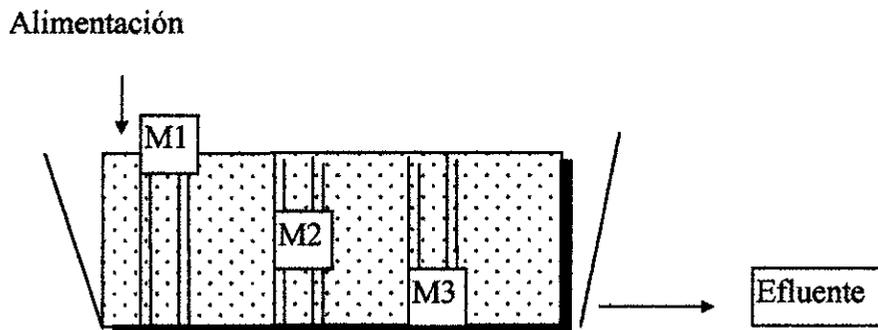


Figura 5.6. Modelo para experimento con trazadores en el humedal artificial de flujo horizontal ubicado dentro del Vivero Forestal de Coyoacán.

Donde:

M1= muestreador 1 en la capa superficial del sistema (aprox 10cm debajo de la superficie)

M2= muestreador 2 en el medio del sistema, donde se encuentra la zona de la rizósfera (aprox de 20 a 30 cm de la superficie)

M3=muestreador 3 al fondo del sistema (más de 40 cm debajo de la superficie)

También se tomarán muestras del efluente.

CAPÍTULO 6
RESULTADOS

RESULTADOS

6.1 Resultados operativos

El resultado final que se obtuvo de la identificación y medición de las variables operativas queda expresado en el balance de materia el cual se presenta en forma de promedios mensuales en la tabla 6.1 y como promedio del mes de julio en la figura 6.1.

En la tabla 6.2 se presentan los problemas operativos que sufrió el sistema en el periodo de operación comprendido de julio a febrero de 1999 y la solución que se les dio.

Las fluctuaciones que presentó el flujo de alimentación al sistema durante todo el periodo, se representan en las gráficas 6.1, 6.2 y 6.3.

6.2 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos.

En la tabla 6.3 se aprecian los resultados de caracterización fisicoquímica en el influente y el efluente, así como los porcentajes de remoción de contaminantes en temporada de lluvia y en época de estiaje. En la tabla 6.4 se presentan los resultados obtenidos para cada parámetro fisicoquímico analizado en el programa de monitoreo y sus gráficas correspondientes (gráficas 6.4 a 6.9).

El único metal encontrado en el agua analizada fue el hierro, y en la tabla 6.5 se muestran las concentraciones en los tres puntos de muestreo y el porcentaje de remoción.

Todos los resultados del análisis de parámetros biológicos se presentan en la tabla 6.6 y en las gráficas 6.10 a 6.14.

**TABLA 6.1. Balance global hidráulico
Promedios mensuales (Julio - Diciembre 1998 y enero, febrero, 1999)**

Mes	GLOBAL		PRECIPITACIÓN PLUVIAL					TRH	T
	Entrada (m ³ /d)	Salida (m ³ /d)	Lluvia en mm	Volumen de precipitación en el humedal(m ³ /d)	Evapotranspiración experimental (cm)	Volumen de evapotranspiración en el humedal (m ³ /d)	Acumulación (m ³ /d)		
JULIO	4.59	4.75	3.22	0.24	0.32	0.02	0.07	4.76	22.50
AGOSTO	1.84	3.73	9.01	0.68	0.17	0.01	0.23	7.19	19.67
SEPTIEMBRE	1.01	1.68	7.93	0.59	0.20	0.02	-0.10	31.63	18.14
OCTUBRE	1.96	6.74	8.05	0.60	0.20	0.02	0.74	22.99	20.38
NOVIEMBRE	2.91	2.37	0.51	0.04	0.26	0.02	0.53	9.07	20.95
DICIEMBRE	1.39	1.05	0.00	0.00	0.22	0.02	0.32	16.14	18.73
ENERO	2.74	2.00	0.00	0.00	0.20	0.01	0.66	12.42	18.09
FEBRERO	3.50	3.15	0.00	0.00	0.26	0.02	0.33	6.30	22.00
PROMEDIO EN EL PERIODO DE OPERACIÓN.	2.49	3.18	3.59	0.27	0.23	0.02	0.35	13.81	20.06

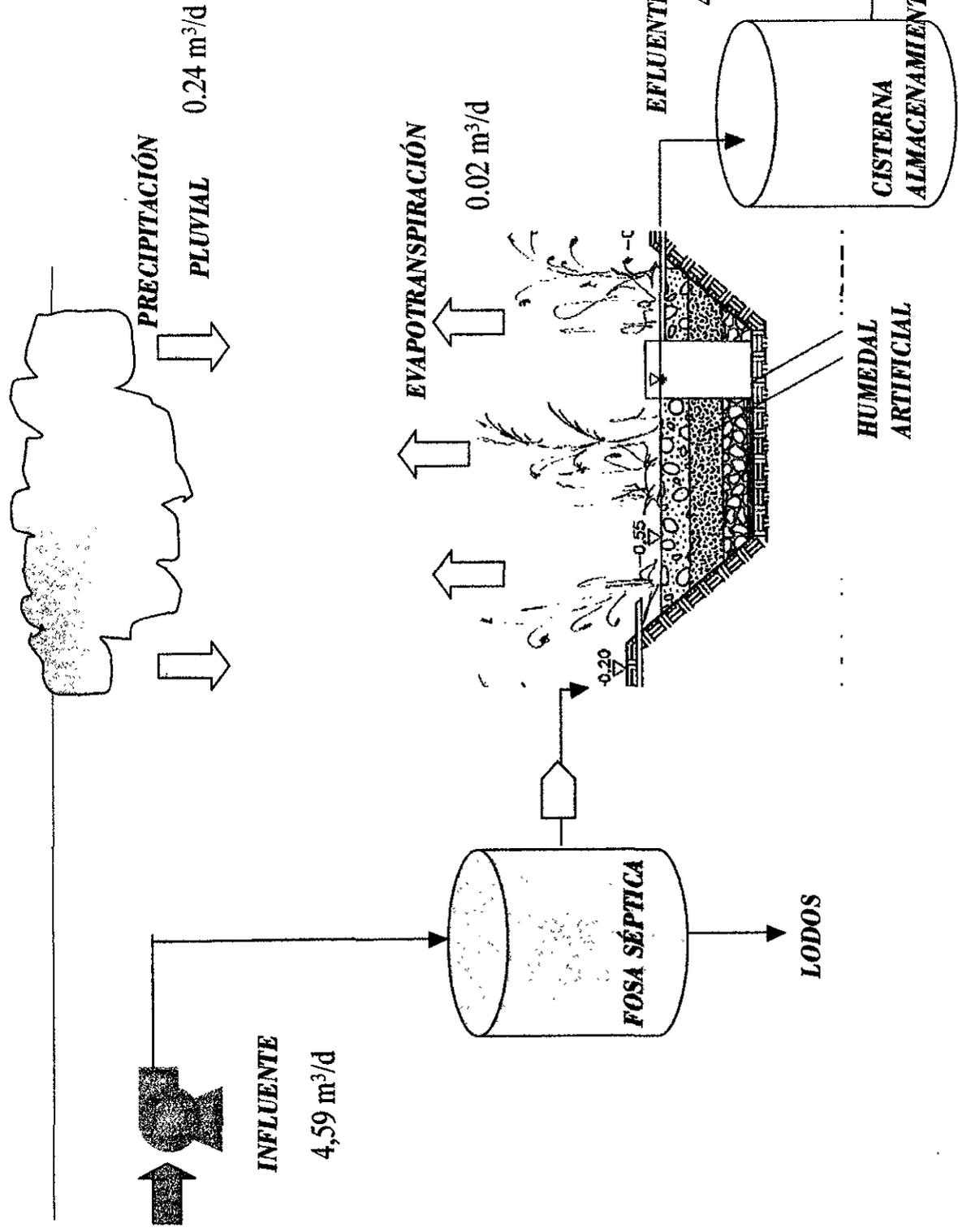
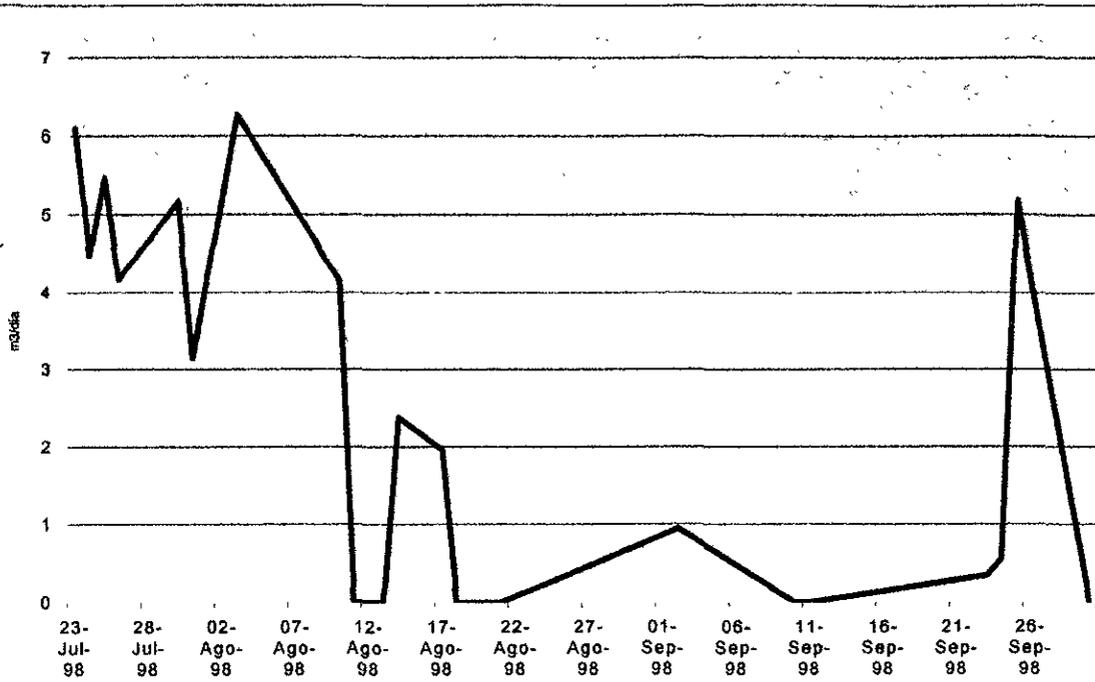
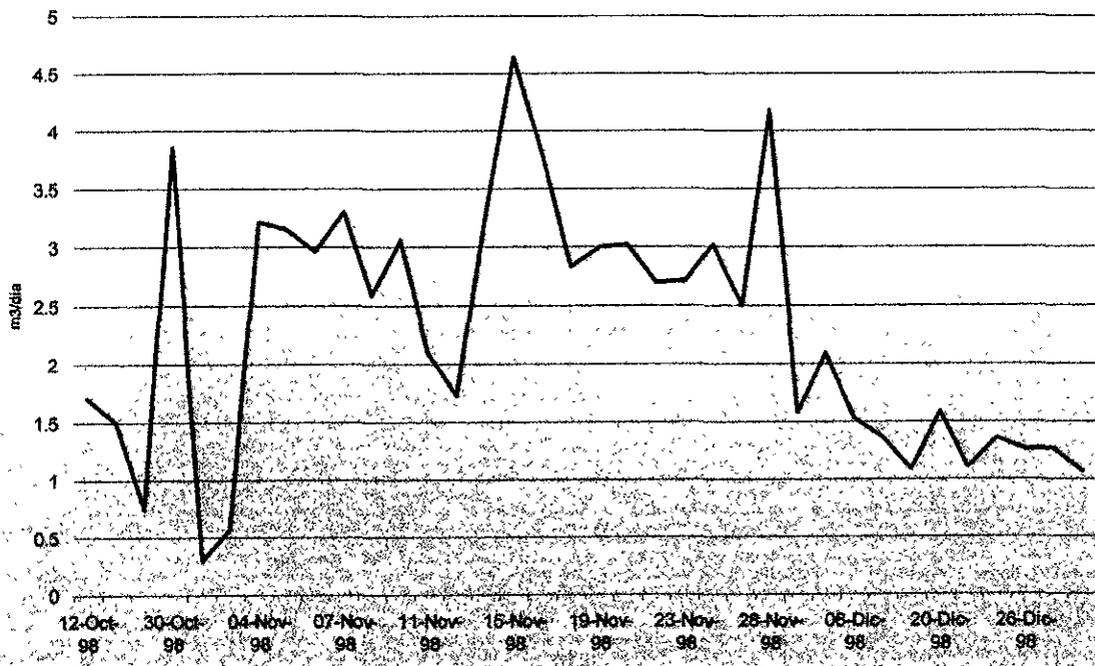


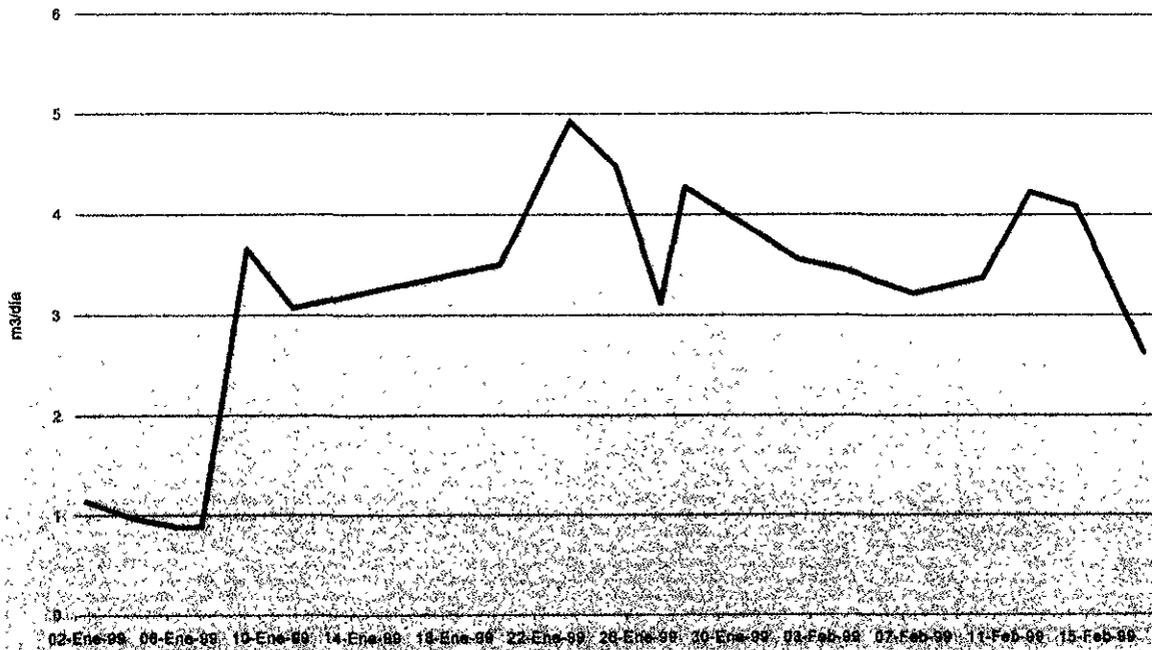
Figura 6.1 Balance global de agua en el mes de julio de 1998 (temporada de lluvias)



Gráfica 6.1. Distribución de flujo de alimentación al humedal en los meses de julio a septiembre de 1998.



Gráfica 6.2. . Distribución de flujo de alimentación al humedal en los meses de octubre a diciembre de 1998.



Gráfica 6.3. Distribución de flujo de alimentación al humedal en los meses de enero y febrero de 1999.

TABLA 6.2. PROBLEMAS OPERATIVOS EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL

Disturbio o Problema	Característica	Sintomas	Modificaciones en la Operación / Acciones correctivas	Periodo de Operación
Falta de alimentación de agua residual	Falla de la bomba de alimentación	Flujo mínimo Aumento del tiempo de residencia Alteración de las poblaciones microbianas	Alimentación por canal	7-14 agosto 98
Falta de alimentación de agua residual y presencia de lluvias	Falla de la bomba de alimentación y ninguna otra alternativa para alimentar agua.	Flujo mínimo Aumento del tiempo de residencia Alteración de las poblaciones microbianas Coloración amarillenta de las plantas por falta de nutrientes	Cambio de bomba de alimentación*	Del 21 agosto - 23 de septiembre 1998 solo se tuvo alimentación pluvial. **Hasta el 20 de enero de 99 se instaló la bomba nueva.
Derrumbe de las paredes que limitan al sistema a causa de las lluvias	Exceso de lodo y tierra en la parte superficial del lecho	Alteración de poblaciones microbianas Aumento de sólidos en el agua del lecho	Remoción de la capa superficial del medio de soporte para eliminar el lodo acumulado	11-13 agosto 98
Presencia de agua en la superficie del lecho	Mal funcionamiento de la bomba de descarga a causa de una falla en el controlador de nivel en la cisterna	Presencia de mosquitos Alteración del tiempo de residencia y patrón de flujo	Eliminar el exceso de agua Cambiar el indicador de nivel y revisar toda la instalación eléctrica Disminuir el flujo de alimentación para aumentar el tiempo de residencia y las cargas al sistema	18-21 agosto 98

Continuación de tabla 6.2

Disturbio o Problema	Característica	Síntomas	Modificaciones en la Operación / Acciones correctivas	Periodo de Operación
Inundación con agua residual proveniente del sedimentador	Falla en el detector de nivel en el sedimentador	Aumento de carga hidráulica y de carga orgánica Trabajo sin descanso de las bombas de alimentación y de descarga del efluente Disminución del tiempo de residencia	Eliminar el exceso de agua Disminuir el flujo de alimentación para aumentar el tiempo de residencia y las cargas al sistema	04 octubre 98
Concentración de sólidos en la alimentación	Falta de mantenimiento a las rejillas de la bomba de alimentación y a las mallas del sedimentador	Azolvamiento de tuberías Disminución de flujo Presencia de sólidos en el agua que se alimenta al sistema Baja eficiencia del sedimentador	Dar el mantenimiento necesario	14 octubre 98
Flujo mínimo	Obstrucción en el medidor de flujo de alimentación	Tuberías de alimentación tapadas Aumento de tiempo de residencia	Mantenimiento correctivo de medidor, tubería, distribuidores y mallas del sedimentador	Durante casi todo el periodo de operación
Crecimiento de hierbas indeseables	Presencia de vegetación extraña en el lecho	Presencia de mosquitos Efecto desagradable a la vista	Si las raíces de estas nuevas plantas no se dejan crecer mucho (menos de 10cm) se pueden cortar manualmente sin riesgo de que hagan canalizaciones. Se deben extraer inmediatamente desde la raíz para evitar que se propaguen.	En temporada de lluvias

Continuación de tabla 6.2

Disturbio o Problema	Característica	Síntomas	Modificaciones en la Operación / Acciones correctivas	Periodo de Operación
Falla en la alimentación de energía eléctrica	Paro de las bombas de alimentación y descarga	Paro total del sistema	Alimentación por canal Ubicación de la falla eléctrica para reportarla de inmediato	18 febrero 99
* Esto se debe a un problema en la adquisición del equipo pues la bomba instalada originalmente no era adecuada para agua residual.				
**Bomba sumergible Barnes de México S.A. para aguas residuales.				

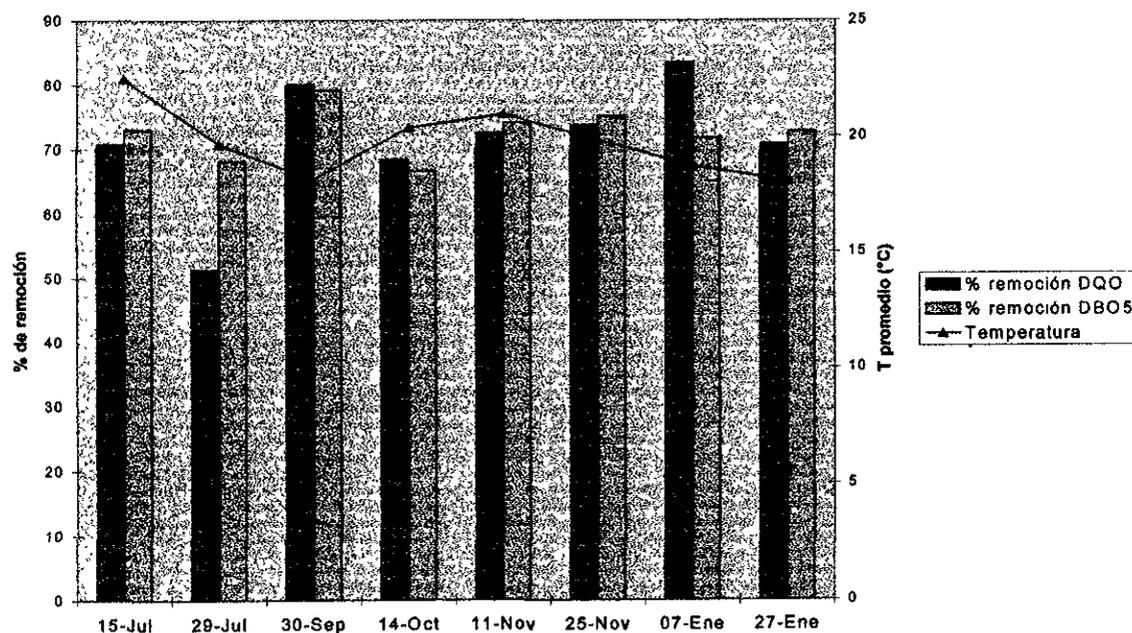
**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Resultados fisicoquímicos

Tabla 6.3. Resultados de caracterización fisicoquímica en el influente, efluente y porcentajes de remoción en presencia y ausencia de lluvias.

Parámetro	Presencia de lluvias			Ausencia de lluvias		
	periodo 1 (julio-octubre)		% remoción	periodo 2 (noviembre-febrero)		% remoción
	Influente	Efluente		Influente	Efluente	
Flujo (m ³ /d)	2.30	4.16		2.61	2.10	
TRH (d)		6.17			8.47	
Temperatura (°C)	18.9	18.5		17.9	16.8	
DBO ₅ (mg/L)	104.00	29.00	71.75	193.13	51.63	73.39
DQO (mg/L)	142.48	42.75	67.62	216.88	54.13	75.09
NH ₃ (mg/L)	1.19	0.35	70.88	31.05	12.81	60.06
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.81	0.65	14.04	3.25	0.87	73.23
PO ₄ (mg/L)	2.10	2.48	-35.70	7.34	3.38	53.95
Ptotal (mg/L)	3.63	3.51	-7.82	10.35	6.12	40.04

* NOTA: Los porcentajes negativos denotan incremento en la concentración



Gráfica 6.4 Porcentaje de remoción de materia orgánica medida como DBO₅ y DQO en función de la temperatura

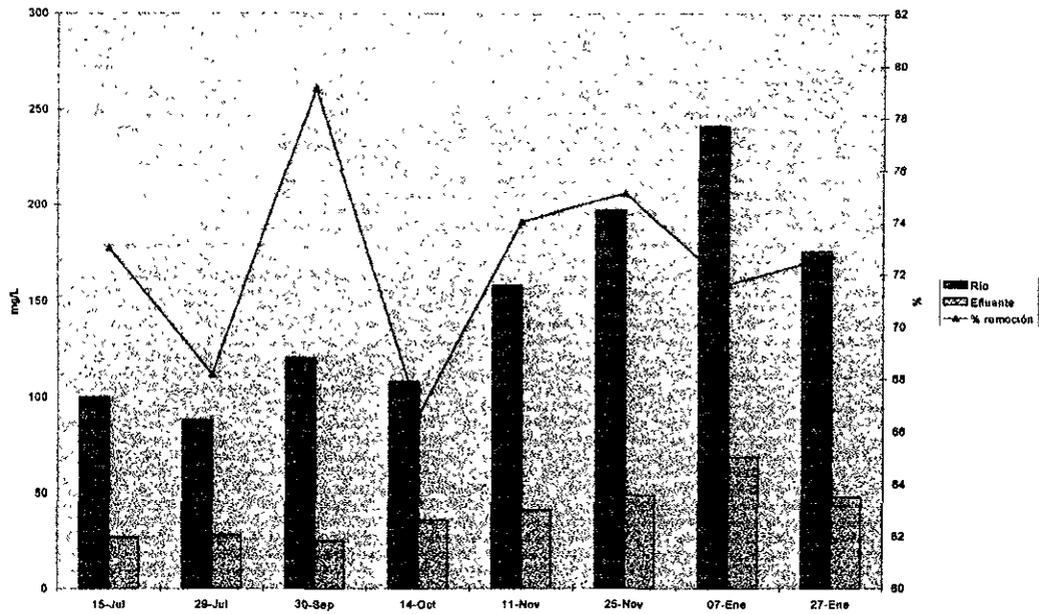
Tabla 6.4. Resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos del agua residual cruda y tratada en el humedal.

Muestreo	DQO (mg/L)		DBO ₅ (mg/L)		pH			T (°C)			
	Río	Fosa	Río	Fosa	Río	Fosa	Efluente	Río	Fosa	Efluente	
15-Jul	130	156	38	100	27	7.1	7.6	7.4	19.7	19.5	18.9
29-Jul	90	134	44	88	28	7.14	7.25	7.32	19.3	19.1	18.2
30-Sep	185	171	37	120	25	6.99	6.9	7.1	18.5	17.9	17.6
14-Oct	165	132	52	108	36	7.47	7.31	7.11	18.2	17.4	17.1
11-Nov	203	196	56	158	41	8.03	7.55	7.18	19	17.6	17.4
25-Nov	260	193	68.5	197	49	7.35	7.12	6.9	18.1	17.2	17.4
09-Dic	x	x	x	x	x	7.41	7.22	7.1	17.9	17.1	16.8
07-Ene	205	189	34	241.5	68.5	7.46	7.25	6.91	17.2	16.4	14.3
27-Ene	200	115	58	176	48	7.42	7.37	6.97	17.3	15.8	14.4

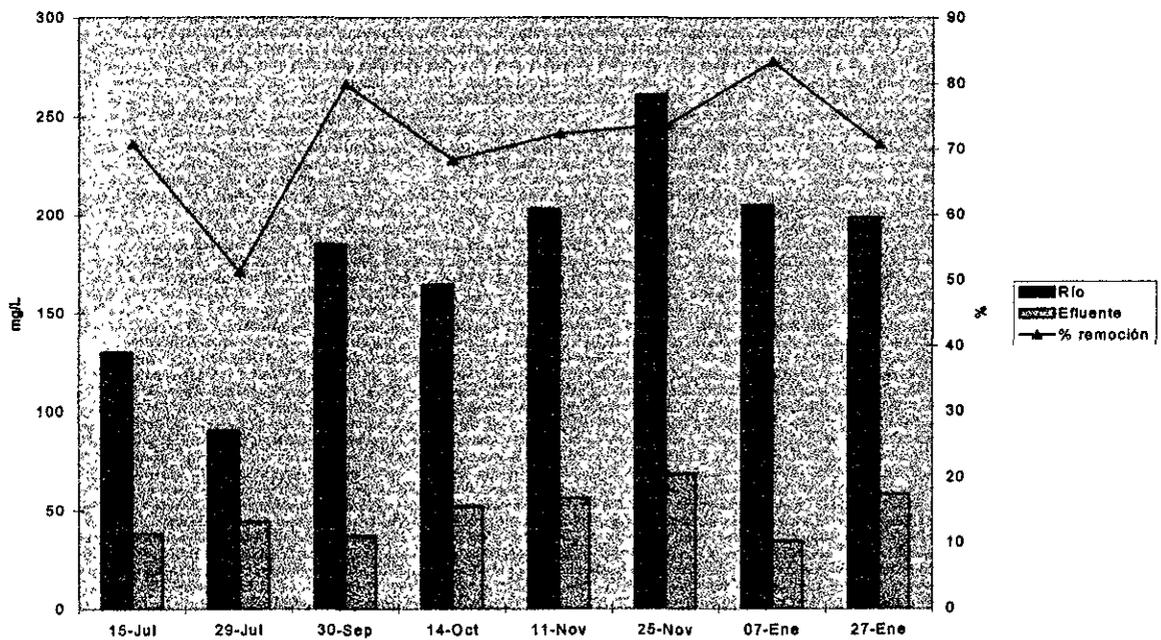
Muestreo	Conductividad(µmhos/cm ²)		O.D. (mg/L)		S. Sed (ml/L)			SDT (mg/L)			
	Río	Fosa	Río	Fosa	Río	Fosa	Efluente	Río	Fosa	Efluente	
15-Jul	498	530	645	1.3	0.9	2.3	0.3	0	250	265	322
29-Jul	466	497	591	0.9	0.7	1.95	2.8	0	235	246	291
30-Sep	304	322	315	6	3.1	0.4	0.3	0	195	182	104
14-Oct	252	298	236	7.5	2.6	0.6	0.2	0	167	149	119
11-Nov	348	308	288	7.9	1.9	0.3	0.3	0	178	156	145
25-Nov	x	x	x	6.5	2.1	0.4	0.3	0	206	182	139
09-Dic	x	x	x	x	x	x	0.3	0	250	215	193
07-Ene	536	525	497	4.1	3.2	0.1	0.2	0	314	298	241
27-Ene	424	394	402	1	2.6	0.4	0.2	0	325	311	257

Muestreo	NH ₃ (mg/L)		NO ₃ (mg/L)		PO ₄ (mg/L)			Ptot (mg/L)			
	Río	Fosa	Río	Fosa	Río	Fosa	Efluente	Río	Fosa	Efluente	
15-Jul	1.24	0.21	0.87	0.18	0.17	0.178	0.178	2.36	4.05	3.83	2.93
29-Jul	0.86	0.15	0.14	0.19	0.172	0.176	0.176	0.98	3.15	2.31	1.51
30-Sep	0.97	0.48	0.16	1.23	1.12	0.8	0.8	1.84	0.97	1.19	3.61
14-Oct	1.7	0.98	0.23	1.65	1.18	1.44	1.44	3.22	3.1	2.58	6.45
11-Nov	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25-Nov	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
09-Dic	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
07-Ene	25.2	16.5	8.31	x	x	x	x	7.46	5.61	3.25	11.5
27-Ene	36.9	28.5	17.31	3.25	1.9	0.87	0.87	7.21	6.1	3.5	9.2
											7.5
											6.2

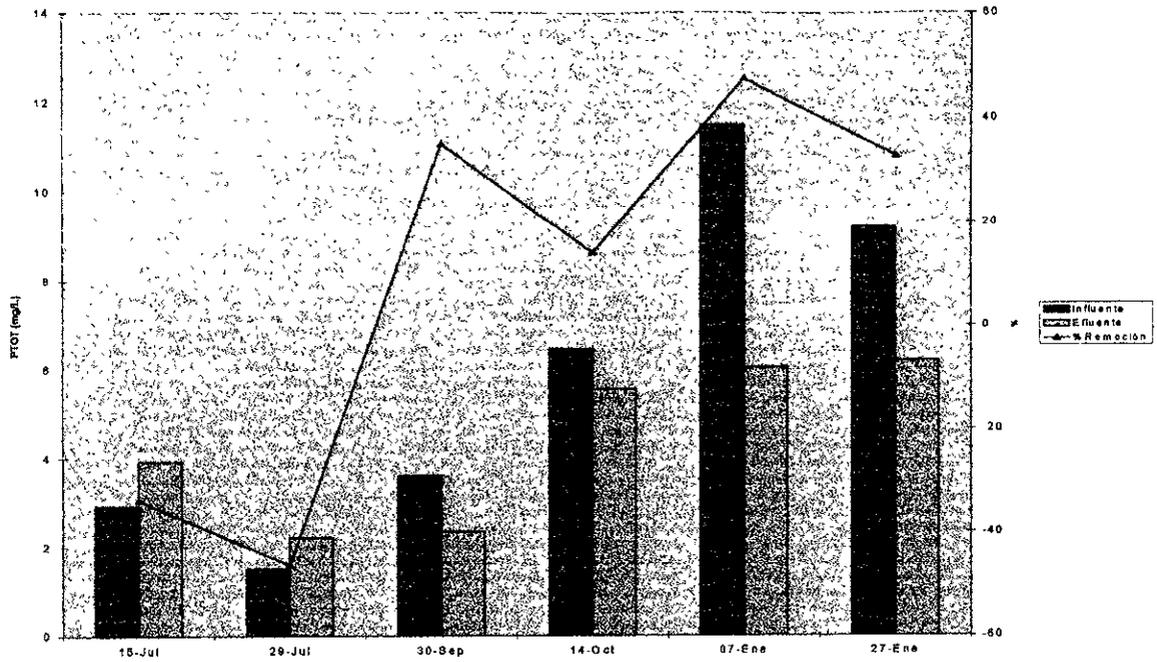
NOTA. Las X indican que no se realizó el análisis



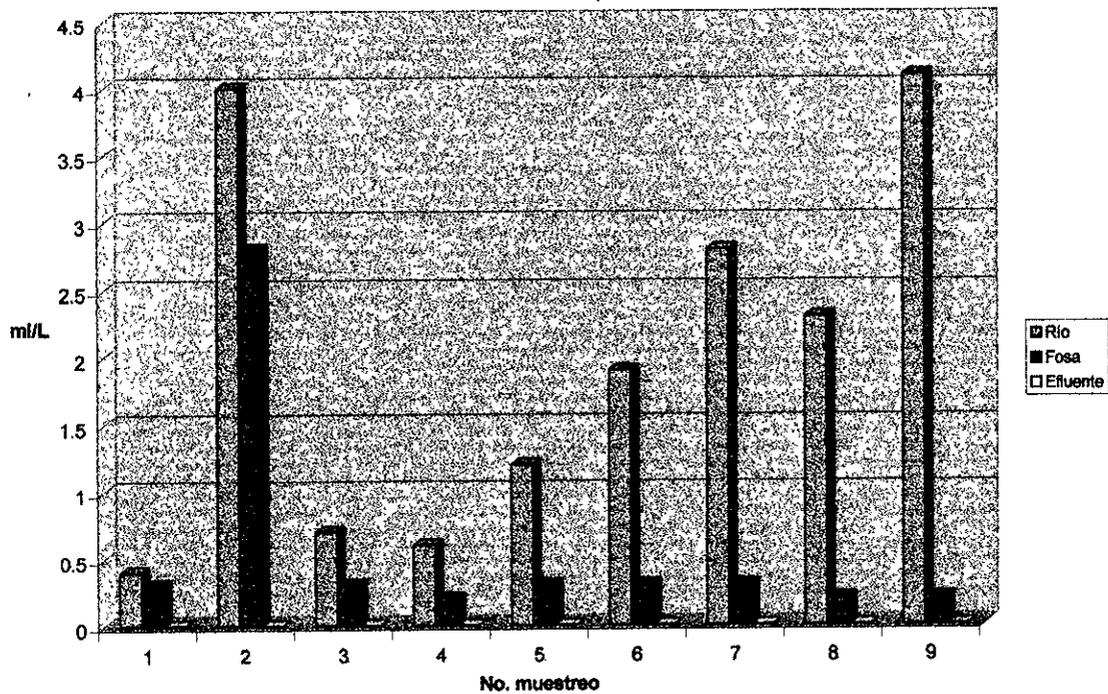
Gráfica 6.5. Concentración de DBO_5 en el influente y en el efluente del sistema y porcentaje de remoción



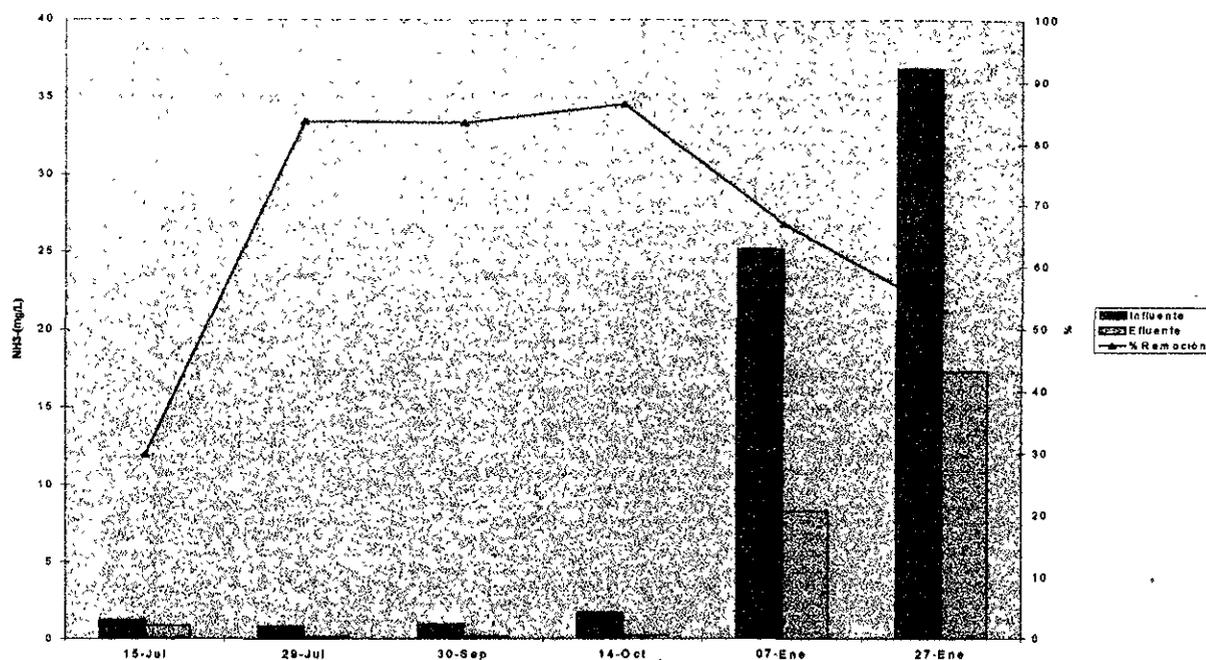
Gráfica 6.6. Concentración de DQO en el influente y en el efluente del sistema y porcentaje de remoción



Gráfica 6.7. Concentración de fósforo total presente en el agua tratada por el humedal y porcentaje de remoción



Gráfica 6.8. Concentración de sólidos sedimentables en los tres puntos de muestreo



Gráfica 6.9 Concentración de nitrógeno amoniacal en el influente y el efluente del sistema y porcentaje de remoción.

Tabla 6.5 Concentración de hierro en el agua tratada por el humedal

Muestreo	Hierro (mg/L)			
	Río	Fosa	Efluente	% remoción
15-Jul	0.15	0.18	0.32	-113.3
29-Jul	0.09	0.14	0.58	-544.4
30-Sep	0.17	0.28	1.59	-835.3
14-Oct	0.29	0.86	1.9	-555.2
11-Nov	0.14	0.32	1.25	-792.9
25-Nov	0.06	0.1	0.45	-650.0
09-Dic	0.18	0.27	0.51	-183.3
07-Ene	0.08	0.15	0.4	-400.0

Nota: Análisis realizado con la técnica de absorción atómica

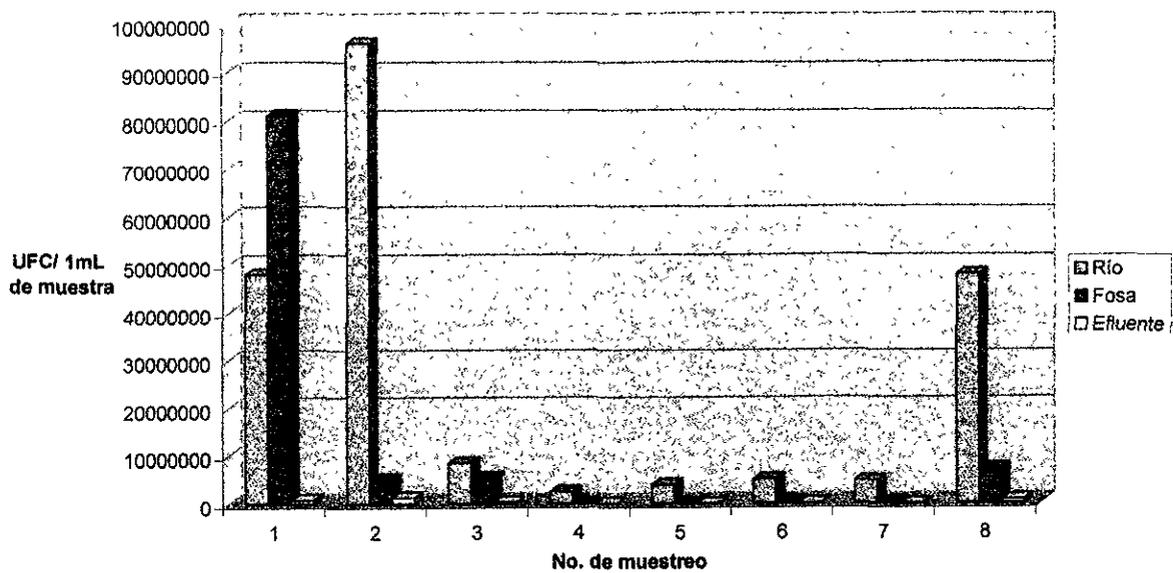
Tabla 6.6. Cuenta total de parámetros microbiológicos después de 48 horas de cultivo.

Parámetro	15-Jul	29-Jul	30-Sep	14-Oct	11-Nov	25-Nov	09-Dic	07-Ene
Mesófilas aerobias (UFC/1ml muestra)								
Río	4.80E+07	9.60E+07	8.40E+06	2.48E+06	3.90E+06	5.00E+06	4.70E+06	4.20E+07
Fosa	8.10E+07	4.90E+06	5.35E+06	1.28E+05	1.44E+05	3.80E+05	3.20E+05	7.10E+06
Efluente	7.60E+05	1.31E+06	3.55E+05	3.40E+04	2.75E+03	2.30E+04	1.34E+04	1.05E+05
% de remoción	98.4	98.6	95.8	98.6	99.93	99.54	99.71	99.75
Salmonella (UFC/1 ml muestra)								
Río	1.25E+05	9.30E+05	8.16E+05	5.10E+05	-	-	-	3.64E+05
Fosa	7.40E+04	5.60E+04	4.78E+04	1.90E+05	-	-	-	7.20E+04
Efluente	5.80E+02	8.00E+02	2.30E+03	6.40E+02	-	-	-	4.20E+02
% de remoción	99.5	99.9	99.7	99.9	-	-	-	99.88
Shigella (UFC/1ml muestra)								
Río	2.71E+05	9.90E+05	6.50E+04	3.57E+04	-	-	-	6.20E+04
Fosa	2.05E+05	1.40E+05	5.10E+04	2.43E+04	-	-	-	2.50E+04
Efluente	7.90E+02	1.92E+03	3.00E+02	9.90E+01	-	-	-	1.05E+02
% de remoción	99.7	99.8	99.5	99.7	-	-	-	99.83
Coliformes totales (UFC/100 ml muestra)								
Río	5.80E+09	6.50E+09	8.70E+08	2.30E+07	4.34E+06	6.70E+06	7.10E+06	5.18E+06
Fosa	3.40E+09	2.40E+09	5.10E+08	5.70E+06	2.66E+06	2.30E+05	2.60E+05	4.22E+05
Efluente	1.56E+05	1.32E+06	1.17E+05	6.40E+04	1.30E+05	6.60E+03	6.80E+03	5.62E+03
% de remoción	99.997	99.98	99.99	99.7	97.00	99.90	99.90	99.89151
Coliformes fecales (UFC/100 ml muestra)								
Río	2.90E+08	3.00E+08	8.10E+07	9.74E+06	1.62E+05	3.10E+05	5.90E+05	4.35E+06
Fosa	2.70E+08	1.90E+08	5.43E+07	7.60E+06	5.13E+04	2.00E+04	2.14E+05	3.88E+04
Efluente	1.20E+05	9.81E+05	1.35E+05	3.80E+04	5.90E+03	5.58E+03	5.29E+03	4.10E+03
% de remoción	99.96	99.67	99.83	99.61	96.36	98.20	99.10	99.91

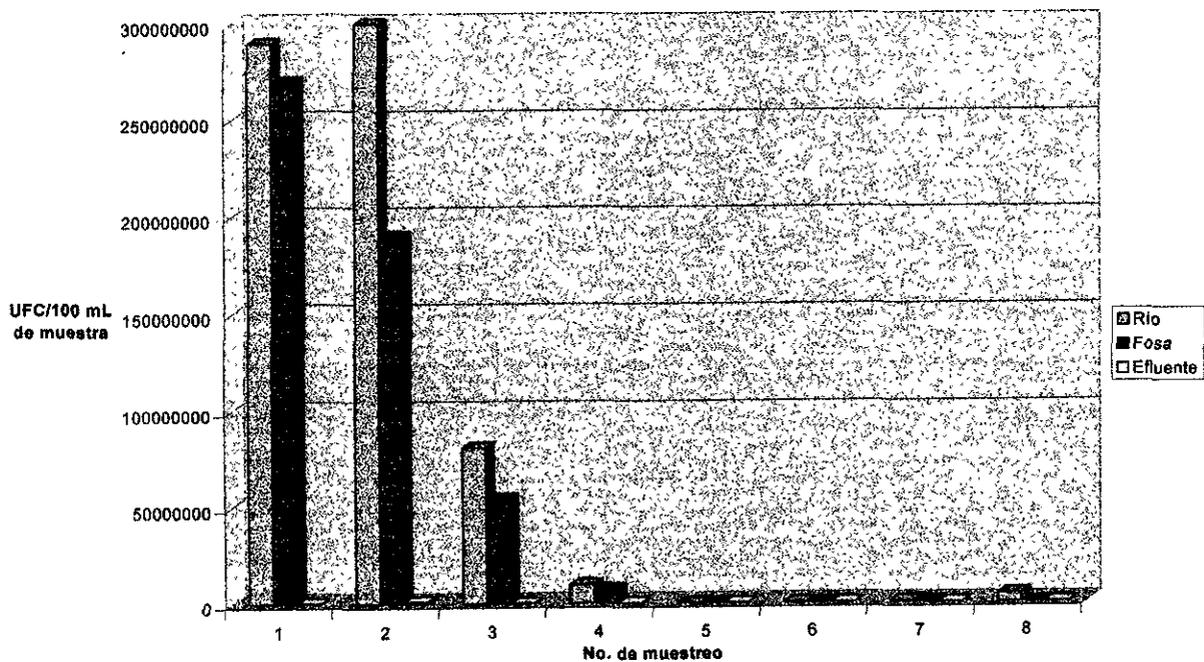
Nota:

Análisis microbiológico con la técnica de filtración por membrana.

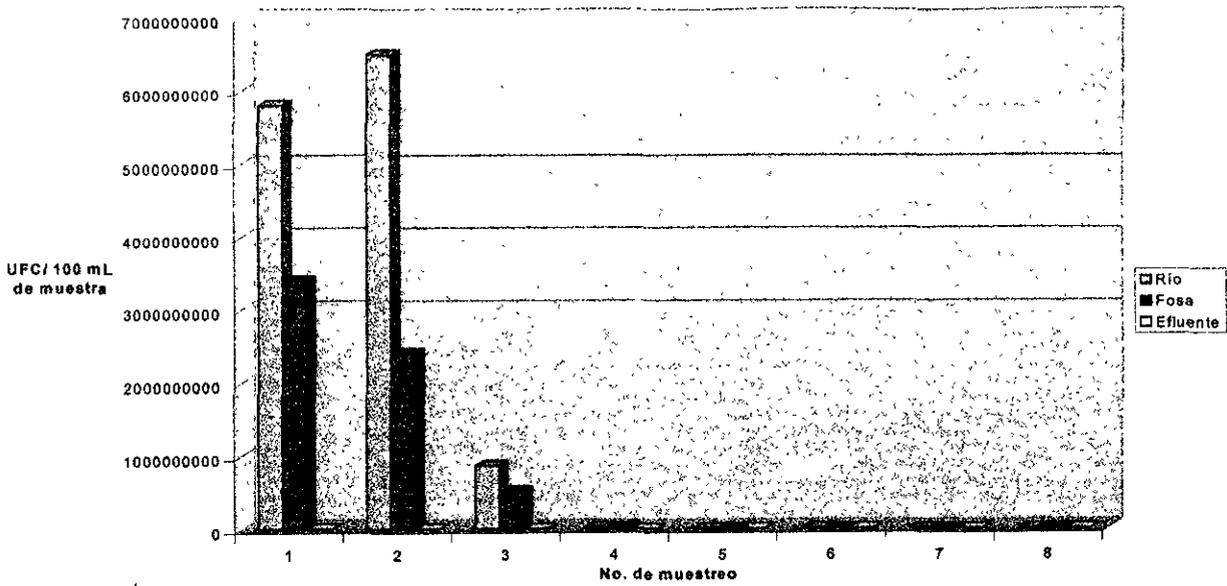
Los guiones indican que no se realizó la determinación.



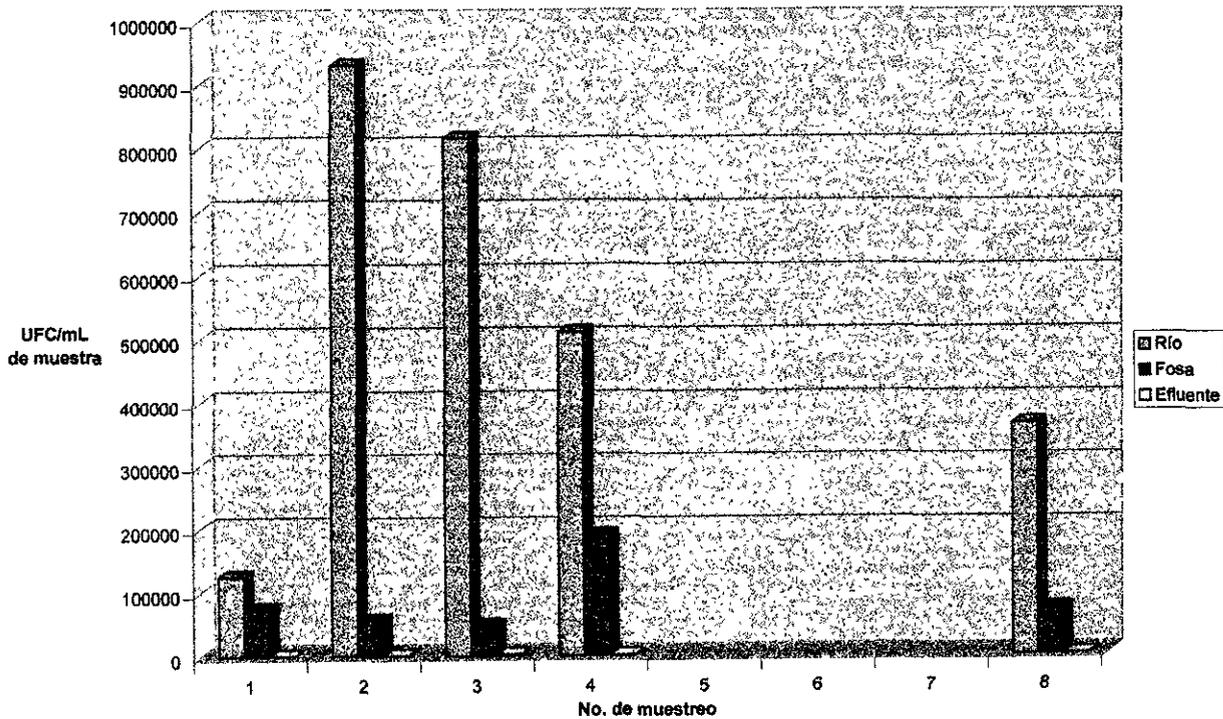
Gráfica 6.10 Cuenta total en placa para bacterias mesófilas aerobias para los tres puntos de muestreo, después de 48 horas de cultivo



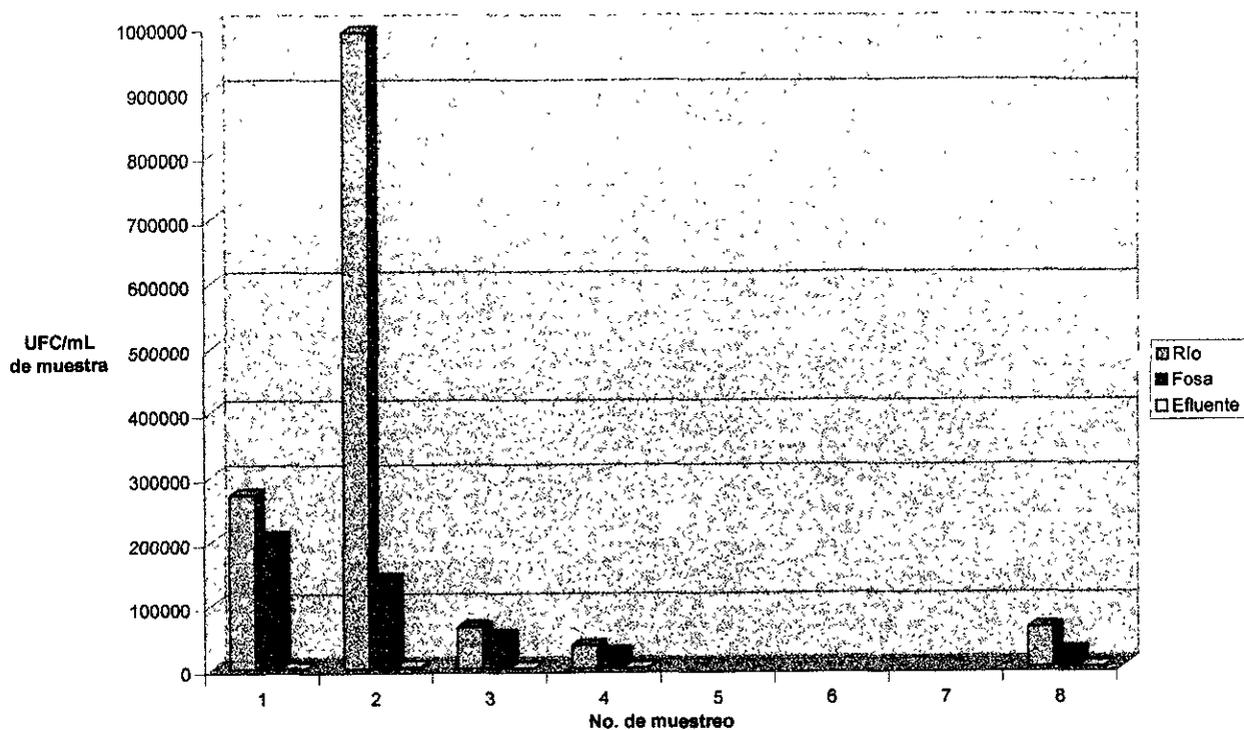
Gráfica 6.11 Cuenta total de bacterias coliformes fecales para los tres puntos de muestreo, después de 48 horas de cultivo



Gráfica 6.12 Cuenta total de bacterias coliformes totales para los tres puntos de muestreo, después de 48 horas de cultivo.



Gráfica 6.13 Cuenta total de Salmonella para los tres puntos de muestreo, después de 48 horas de cultivo.



Gráfica 6.14 Cuenta total para Shigella para los tres puntos de muestreo, después de 48 horas de cultivo.

Para las gráficas 6.10 a 6.14 los números de muestreo corresponden a las siguientes fechas de muestreo:

Num.de Muestreo	Fecha
1	15-julio-98
2	29-julio-98
3	30-sept-98
4	14-oct-98
5	11-nov-98
6	25-nov-98
7	09-dic-98
8	07-enero-99

CAPÍTULO 7
ANÁLISIS Y
DISCUSIÓN DE
RESULTADOS

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Resultados operativos

Los resultados obtenidos en todo el periodo de operación indican inestabilidad, esto se debe a la presencia de problemas operativos impredecibles que impidieron una continuidad en el funcionamiento del sistema. La temporada en la que se presentaron más problemas, debido a la fuerte precipitación pluvial fue en el mes de agosto el caudal del río Magdalena aumentó como en un 50% y la cantidad de tierra y lodo que arrastraba era muy grande, situación que propició que la bomba de alimentación se atascara con facilidad e inclusive se quemara en una ocasión. La bomba recibía mantenimiento constante pero como su diseño no era adecuado para manejar lodos se decidió cambiarla por una especial para aguas residuales.

El cambio no fue tan rápido como se hubiera querido, por lo que los problemas en la alimentación se siguieron dando y se optó por alimentar el agua residual al sistema por un canal lateral. Este remedio tampoco funcionó al 100% debido a que el canal se encuentra al aire libre y causa mal olor, por tal motivo, las autoridades encargadas de los viveros decidieron que solamente se ocupara el canal de las 18:00 a las 6:00 horas, siendo insuficiente para cumplir con un flujo continuo y de 5.6m^3 diarios programados.

En la literatura se reporta que este tipo de sistemas resisten largas temporadas sin alimentación alguna, sin embargo, el humedal se vio un poco afectado pues al ser la precipitación pluvial la única fuente de agua se provocó que una gran cantidad de microorganismos murieran y que las plantas tomaran una coloración amarilla, conocida como clorosis, causada por la falta de nutrientes en el lecho (Cooper, 1996).

Otro disturbio que sufrió el sistema fue que debido a que el humedal se encuentra aproximadamente a 1.5 metros abajo del nivel del suelo y las paredes que lo limitan son de tierra compactada, a causa de las fuertes lluvias, parte de estas paredes se desprendieron y cayeron dentro del lecho provocando altas concentraciones de tierra y lodo en la superficie del mismo.

El flujo del sistema en todo el periodo de operación presentó grandes variaciones debidas a los diferentes problemas que ocurrieron (gráficas 6.1, 6.2 y 6.3), principalmente a que el medidor de flujo se obstruía con gran facilidad y era necesario darle mantenimiento casi cada tercer día.

Algunos de los problemas que sucedieron durante el estudio fueron de diseño, pero la mayoría fueron de tipo impredecible y por lo tanto estuvieron fuera de las manos del operador. El sistema no tenía vigilancia en toda la noche y muchos disturbios ocurrieron en esas horas, por lo que se recomienda que en una planta en operación se tenga un operador en el turno nocturno (Jiménez, 1999).

Hubo ocasiones en las que el problema o falla no se pudo solucionar de modo inmediato por lo que fue necesario parar el sistema por varios días, como en la ocasión en que se atascó la bomba de alimentación. Esto repercutió directamente sobre la eficiencia y la estabilidad del sistema.

7.2 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos

En términos generales puede decirse que todos los valores de calidad de agua obtenidos al final del tratamiento o efluente, permiten su descarga en ríos y suelos de uso agrícola, de acuerdo en lo indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Sin embargo, los parámetros de coliformes fecales y DBO no cumplen con lo establecido por la NOM-003-, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos (ver tablas 7.1 a, 7.1 b y 7.2). Esto quiere decir que el agua tratada por el humedal cumple para ser descargada en suelo o agua pero no para ser reusada en servicios al público con contacto directo como llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí, fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques.

Es posible que mediante la implementación de un post tratamiento de desinfección sean eliminadas las bacterias coliformes existentes en el efluente para que el agua tratada pueda ser utilizada de acuerdo a la NOM-003- ECOL-1997, arriba citada, en servicios al público con contacto indirecto u ocasional como riego de jardines en donde el público en general no esté expuesto directamente, riego de camellones en avenidas y autopistas, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, llenado de lagos artificiales no recreativos y panteones.

Tabla 7.1 a. Extracto de la NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes básicos en las descargas de aguas residuales.

Parámetro	Unidades	Uso en riego agrícola		Uso público urbano	
		PM	PD	PM	PD
Temperatura	°C	NA	NA	40	40
Grasas y aceites	mg/L	15	25	15	25
Materia flotante	mg/L	Ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos sedimentables	ml/L	1	2	1	2
Sólidos solubles totales	mg/L	150	200	75	125
DBO5	mg/L	150	200	75	150
Nitrogeno total	mg/L	40	60	40	60
Fósforo total	mg/L	20	30	20	30
PM Promedio mensual					
PA Promedio diario					
NA No aplica					

Tabla 7.1 b. Extracto de la NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de metales pesados y cianuros en las descargas de aguas residuales.

Suelo (uso en riego agrícola)			
Metales	Unidades	PM	PD
As	mg/L	0.2	0.4
Cd	mg/L	0.05	0.1
Cn	mg/L	2	3
Cu	mg/L	4	6
Cr	mg/L	0.5	1
Hg	mg/L	0.005	0.01
Ni	mg/L	2	4
Pb	mg/L	5	10
Zn	mg/L	10	20

Tabla 7.2 NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas

PROMEDIO MENSUAL					
TIPO DE REUSO	Coliformes Fecales NMP/100mL	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y Aceites (mg/L)	DBO₅ (mg/L)	SST (mg/L)
SERVICIO PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤1	15	20	20
SERVICIO PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1000	≤5	15	30	30

Tabla 7.3 Concentración de contaminantes encontrados en el efluente del sistema durante el primer año de operación.

PROMEDIO MENSUAL					
TEMPORADA	Coliformes Fecales NMP/100mL	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y Aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
LLUVIAS	1.2x10 ⁵	0*	N.C	29	N.C
SECAS	5.1x10 ³	0*	N.C	52	N.C
Notas: *Falta constatar, probablemente no se encuentren debido a las características propias del medio de soporte empleado en el humedal. N.C. Parámetro no considerado.					

A continuación se ampliará brevemente el análisis en los parámetros de mayor interés.

Remoción de materia orgánica como DBO₅ y DQO. Los resultados de DBO₅ y DQO en los muestreos de julio a octubre muestran que hay una baja concentración de materia orgánica, esto se debe a la temporada de fuertes lluvias que ocasionaron la dilución de contaminantes en el agua cruda del río Magdalena.

Es muy evidente una baja en la remoción de contaminantes al final del mes de julio y en el mes de octubre debido a los problemas operativos que ocasionaron paros de emergencia en el sistema, sin embargo de noviembre a enero parece que hay una tendencia estable de un 75 a 80 % en la remoción de contaminantes orgánicos (gráfica 6.4). De manera particular este porcentaje en términos de DBO₅, en temporada de lluvias, fue de 72% y, en ausencia de lluvias, alcanzó un promedio de 74% (gráfica 6.5). En términos de DQO el porcentaje de remoción de materia orgánica, en presencia de lluvias, fue en promedio del 67% y, en ausencia de lluvia aumentó a 75% (gráfica 6.6). Por lo anterior se puede deducir que el comportamiento depurativo durante esta etapa de operación es similar a la etapa de arranque, presenta altibajos y la eficiencia de remoción esperada aún no se alcanza. En los últimos meses monitoreados se aprecia una tendencia a la estabilidad estando ya solucionados los problemas operativos imprevistos, por lo que se espera que la eficiencia aumente y se mantenga de ahí en adelante.

Sólidos sedimentables. En el tratamiento primario (fosa) se logró un promedio del 68% de eliminación de Sse y en términos globales el sistema elimina el 100% de los mismos (gráfica 6.8). Cuando el porcentaje de eliminación de sólidos en el tratamiento primario disminuye, es un claro indicio de que se debe realizar mantenimiento a la fosa séptica y a las tuberías de alimentación del sistema.

pH y conductividad eléctrica El pH se ha mantenido constante en todos los muestreos (alrededor de 7 unidades), en los tres puntos de muestreo, río, fosa y efluente, y la conductividad eléctrica permanece dentro de un rango de 300 a 600 $\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$. Lo anterior indica que el agua no presenta alto contenido de sales.

Hay ocasiones en las que la conductividad disminuye en la fosa debido a la precipitación de sales, pero registra un ligero aumento en el efluente que probablemente se deba a la disolución de algunas sales presentes en el medio de soporte (tabla 6.3), lo cual no altera de manera significativa la calidad del efluente.

Oxígeno disuelto. La concentración de oxígeno disuelto contenido en el río se encuentra en un intervalo de 0.9 a 7.5 mgO_2/L , esta cantidad va disminuyendo al llegar a la fosa y, en el efluente las concentraciones siguen decreciendo hasta alcanzar valores de 0.1 a 1.95 mgO_2/L (tabla 6.3). Este comportamiento puede deberse a varias razones, entre ellas a la presencia del sistema de entubado antes de llegar a la fosa, impidiendo la actividad fotosintética, es decir su aereación natural y el aporte de gran cantidad de compuestos orgánicos biodegradables sumados a la elevación de bióxido de carbono por la descomposición orgánica activa dentro de la fosa. En el efluente las concentraciones debería aumentar el oxígeno libre en solución debido al tratamiento aerobio en el humedal y por la caída de agua del efluente hacia la cisterna.

Nitrógeno amoniacal. Las concentraciones de nitrógeno amoniacal en el río en temporadas de lluvia fueron muy bajas debido a la dilución provocada por ésta. Los valores en los tres puntos de muestreo, río, fosa y efluente, presentan valores menores a 2 mg/L . En el mes de

enero las concentraciones aumentan pues no hay presencia de lluvia y la temperatura ambiental no es tan alta como para evaporar al amoniaco. De cualquier modo el agua del efluente cumple con la NOM-001-ECOL-1996 para ser descargada a suelo como agua de riego y el porcentaje de remoción de este parámetro en el humedal alcanzó un 83% (gráfica 6.9)

Fósforo total. La concentración promedio obtenida de las muestras colectadas en los tres puntos de muestreo resultó menor a 7 mg/L en los primeros meses de operación, en enero la concentración máxima fue de 11 mg/L en el río y de 6.2 mg/L en el efluente, por lo cual se encuentra dentro de lo establecido por la normatividad nacional vigente que establece un límite de 20 mg/L en la descarga de agua tratada para uso de riego.

En el río el valor promedio encontrado es de 5.87 mg/L, en la fosa de 5.61 mg/L y en el efluente de 4.38 mg/L (gráfica 6.7), es decir que, a través del humedal, ocurrió únicamente el 25% de eliminación de este elemento, porcentaje aceptable para sistemas de flujo horizontal y con menos de un año de operación.

Metales. Con la técnica de absorción atómica se realizaron análisis de los siguientes metales: cadmio, cianuro, cobre, cromo, zinc, plomo, níquel, hierro, y en una ocasión de mercurio. El único metal encontrado en los tres puntos de muestreo fue hierro. En el río se registraron concentraciones menores a 0.3 mg/L que aumentaron al llegar a la fosa y también en el efluente alcanzando los 1.9 mg/L (tabla 6.5), que puede deberse a la disolución del hierro presente en el medio de soporte. Este valor no constituye ningún problema de acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996.

Adicionalmente, en el muestreo del 29 de julio se detectaron trazas de níquel en el agua del efluente (0.03 mg/L), concentración que está muy por debajo de lo establecido por la norma antes citada, la cual está entre 2 y 4 mg/L, para uso en riego agrícola.

Análisis microbiológico. Se puede observar tanto en las tablas como en las figuras el comportamiento de los grupos bacterianos cuantificados por diferentes técnicas bacteriológicas. Para el caso del primer punto de muestreo (río), se observa que tanto la cuenta total de bacterias mesófilas aerobias, como de coliformes totales y fecales se encuentran en gran cantidad, esto indica que este tipo de agua doméstica está muy contaminada por desechos orgánicos, heces fecales humanas y de animales. Es importante señalar la presencia de microorganismos patógenos como *Salmonella* y *Shigella* pues la cuenta total también es alta lo que indica que este tipo de agua es un foco de infección que puede dar origen a enfermedades tales como fiebre tifoidea y disenteria bacilar.

En el segundo punto de muestreo (fosa), se observa que existe una disminución de los grupos bacterianos presentes, aunque en un bajo porcentaje. Esto se debe probablemente a que el agua doméstica al estar en la fosa séptica permite la sedimentación de sólidos junto con algunas bacterias y en conjunto con procesos de biodegradación anaerobia, hacen posible la remoción parcial de éstas. Para el caso del tercer punto (efluente) se observa también una tendencia a la disminución de todos los grupos bacterianos cuantificados (tabla 6.6 y gráficas 6.10 a 6.14), esto se debe a que al pasar el agua doméstica por el sistema de tratamiento biológico (humedal), existe una retención de bacterias tanto en los poros del material de empaque como en las raíces de las plantas y sobre todo por parte de grupos de protozoos que eliminan a las bacterias del agua, ya que son su principal fuente de alimento. En comparación con valores reportados por plantas de tratamiento convencionales con porcentajes de eliminación del 90 al 98%, la planta piloto tuvo un buen desempeño.

Cabe señalar que no obstante la alta remoción de bacterias a lo largo del tren de tratamiento, la calidad del efluente no cumple con lo establecido en la norma de calidad de agua para descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, 1000 coliformes fecales NMP/100 mL, promedio mensual (NOM-001-ECOL-1996), ni para su reúso en riego agrícola o de jardines clasificados como de contacto directo, 240 coliformes fecales NMP/100 mL (NOM-003-ECOL-1997). La presencia de *Salmonella* y *Shigella* en el efluente, hace necesario que se realice un post tratamiento de desinfección en el agua tratada por el humedal, a efecto de poderle dar el correcto uso.

Presencia de microorganismos. Los principales grupos de bacterias encontrados en grandes cantidades en la primera etapa del humedal o zona de alimentación, vistos al microscopio, fueron las diatomeas, que ocasionan mal olor y son indicadores de que el agua está aún contaminada. También se encontró la presencia de algunos ciliados, material suspendido y agregados de bacterias que indican que hay degradación de materia orgánica. En la segunda etapa del humedal o parte media la vida microbiana presenta mayor población y existen grupos de diatomeas, en menor cantidad que la etapa anterior, agregados de bacterias, ciliados y flagelados.

En la parte final del humedal artificial el agua no presenta olor desagradable, hay muy pocas diatomeas, varias especies de ciliados, flagelados, nemátodos y algunos agregados de bacterias. Los microorganismos presentes son los que intervienen en diversas transformaciones químicas que permiten el equilibrio normal de la vida acuática y llevan a cabo procesos de degradación de contaminantes orgánicos en el agua residual y es una parte muy importante en el estudio de humedales, por lo que se sugiere un estudio más profundo sobre estos aspectos.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el estudio realizado se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Se identificaron las variables de operación necesarias para el buen funcionamiento del humedal artificial de flujo horizontal. Debido a que se trabajó bajo condiciones de operación reales, se detectó la presencia de problemas operativos impredecibles que alteraron las condiciones operativas estables y ocasionaron altibajos en la eficiencia de tratamiento, lo cual es normal dentro del funcionamiento real de este tipo de sistemas.
- Los paros de emergencia efectuados, donde hubo largos periodos sin alimentación al sistema, ocasionaron situaciones de “re-arranque” de la planta, situación que se vio reflejada en la eficiencia de remoción y estabilidad del sistema, no obstante, el humedal presentó una rápida adecuación a dichas condiciones cambiantes.
- Los principales problemas en la operación se derivan de la etapa de procura de equipo. La bomba de alimentación y el medidor de flujo no cumplieron con las expectativas requeridas para este tipo de aguas residuales. La bomba de alimentación requirió ser cambiada por una que permitiera el manejo de agua con lodos, mientras que al medidor se le requirió un mantenimiento correctivo semanal para evitar azolvamiento en la zona de alimentación y disminución del flujo. Debe recordarse que normalmente los humedales artificiales no requieren contar con sistemas de bombeo para alimentación del agua residual a tratar, por lo que este tipo de problemas encontrados se evitarían.
- Los resultados obtenidos en el experimento realizado con cloruro de sodio como trazador en el reactor experimental, hacen suponer que el patrón de flujo del humedal tiende a ser de flujo tapón con dispersión axial y cuenta con la presencia de zonas muertas o estancadas en las paredes y esquinas del mismo, lo cual deberá corregirse eventualmente a efecto de maximizar la eficiencia del sistema.

- Quedaron establecidas las actividades mínimas necesarias para una correcta operación y un programa de mantenimiento.
- Se verificó que las actividades de mantenimiento y operación normales en el humedal involucran bajos costos y pocas horas hombre en comparación con otros sistemas de tratamiento.
- Los parámetros mínimos para establecer la calidad del tratamiento del agua en el sistema son DBO₅, DQO, pH, temperatura, oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, fósforo total, sólidos, conductividad hidráulica y coliformes fecales.
- La calidad obtenida en el efluente cumple para ser descargada en suelo o agua pero no para ser reusada en servicios al público con contacto directo como llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí, fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques; es decir, cumple con la NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Sin embargo, los parámetros de coliformes fecales y DBO no cumplen con lo establecido por la NOM-003-, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas para reúso en servicios públicos, por lo cual deberá realizarse un post-tratamiento de las mismas.
- En la última etapa del estudio, comprendida de noviembre a enero, las eficiencias de remoción de contaminantes tienen una tendencia ascendente y se mantienen en un intervalo del 75 al 80%, esto indica que el sistema se está estabilizando y que la actividad de los microorganismos que biodegradan la materia orgánica va en aumento, lo cual es el comportamiento normal de este tipo de sistemas, ya que tardan aproximadamente un año en estabilizarse operativamente, tiempo durante el cual la eficiencia aumenta.

En cuanto a las recomendaciones, se tienen los siguientes puntos:

- Medir el tiempo de residencia hidráulico del sistema piloto empleando cloruro de litio como trazador, de acuerdo a lo propuesto en el capítulo 5, y verificar el patrón de flujo.
- Repetir el balance global de agua en condiciones estables de operación con la finalidad de observar el comportamiento del humedal a un flujo de diseño propuesto, $5.6 \text{ m}^3/\text{d}$, y en un futuro, alcanzar condiciones máximas en la operación.
- Hacer muestreo y análisis fisicoquímicos en los tubos muestreadores ubicados dentro del humedal para evaluar la eficiencia de remoción a lo largo del lecho y compararla con la presencia de poblaciones microbianas presentes en los alrededores de cada uno, y conocer si existe o no relación entre ambos parámetros. En cuyo caso permitirá evaluar de manera rápida y directa la calidad fisicoquímica del agua en tratamiento.
- Hacer una evaluación del costo de operación y mantenimiento del sistema y compararlo con otros sistemas de tratamiento que traten volúmenes de agua similares.

CAPÍTULO 9

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. APHA. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. 19th Ed. American Public Health Association. AWWA and WPCF, Washington DC, EUA.
2. Babbitt, E. y Baumann, R. 1988. Sewerage and sewage treatment. 8ª edición.
3. Brix, H. 1994. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. IAWQ biennial Conference. Budapest Hungary. Pp. 344-389.
4. Brix, H. 1996. Role of macrophytes in constructed wetlands. 5th International Conference on wetland systems for water pollution control. Viena. Austria. Pp 2-1-2-6.
5. Bonilla, P. y Ramírez, E. 1993. Sistema de tratamiento de lechos de raíces. Las amebas de vida libre. ICYT. 15 (203): 22-25.
6. CNA, 1997. Gerencia de saneamiento y calidad del agua, Subgerencia de laboratorios. Información de la estación hidrológica Santa Teresa localizada en el río Magdalena.
7. Commet, I., Sámano, J. y Noyola, A. 1997. Docencia, capacitación e investigación en materia de tratamiento de aguas residuales basadas en la operación de una planta de tratamiento. Memorias técnicas XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Pp. 309-319.
8. Cooper, F., Job, D., Green, B. y Shutes, R. 1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. WRc plc. Pp.53-59.

9. Davies, H., y Hart, T. 1990. Reed bed treatment of wastewaters in a pilot scale facility. In *Advances in Water Pollution Control*. Edited by P.F. Cooper and B.C. Findlater. Inglaterra. Pp. 517-520
10. DDF, 1991. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. El Río Magdalena nuevamente sano. Programa de rescate del río Magdalena y regeneración de barrancas de la región. Folleto de difusión.
11. Durán, M.C. 1994. Tratamiento biológico de aguas de la industria química y de proceso. Ciudad Universitaria, México, D.F. Pp.10-13.
12. Durán, M.C; Haberl, R; Jiménez, J; Luna-Pabello, V; Millán, S; Miranda, M; Ramírez, H. y Schaller, P. 1998. Los humedales artificiales, una ecotecnología viable para el tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos urbanos de México., II Simposium Internacional "Gestión y Tecnologías apropiadas para el agua en pequeños núcleos habitados", Barcelona, España. Octubre de 1998.
13. Fair, G. y Geyer, J. 1998. Ingeniería sanitaria y de aguas residuales 2, Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Decimocuarta reimpresión. Limusa, México. Pp. 48-49, 445-448, 467-471.
14. Fisher, J. 1990. Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond, NSW, Australia. In *Advances in Water Pollution Control*, P.F. Cooper and B.C. Findlater (Eds.) Pergamon Press, Oxford, Pp. 21-23.
15. Geller, G. 1996. Horizontal flow systems for wastewater treatment. long term scientific and practical experiences; recomendations. 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena. Austria. Pp III-3-1-3-8.

16. Girts, M. y Knight, R. 1989. Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural. Edited by Donald Hammer, Lewis Publishers, Inc. EUA. Cap 34. Operations optimization. Pp.417- 427.
17. González, U.L. y Rosete V.R. 1998. Elaboración de composta a partir de material vegetal y lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas de Ciudad Universitaria. Tesis de licenciatura. UNAM. México, D.F.
18. Haberl, R. 1997. Constructed wetlands in europe with emphasis to Austria. Tercer Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D.F. Pp. 232-245.
19. Haberl, R. y Perfler, R. 1989. Seven years of research work and experience with wastewater treatment by a reed bed system. Institut für Wasserversorge, Gewässsergüte und Fischereiwirtschaft. Universität für Bodenkultur, A-1180 Viena, Austria. Pp.205-214.
20. Jiménez, T, J. 1999. Construcción y arranque de un sistema de tratamiento de agua residual tipo humedal artificial de flujo horizontal. Tesis de licenciatura. UNAM. México, D.F.
21. Kadlec, R. H. 1994. Detention and mixing in free water wetlands. Ecol. Engin. Vol. 3. Pp.345-380.
22. Kadlec, R. H. 1995. Overview: surface flow constructed wetlands. Water Science and Technology. Vol.32, No.3. Pp.9-12.
23. King, C; Michell, A. y Howes, T. 1996. Hydraulic tracer studies in a pilot scale subsurface flow constructed wetland. 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena. Austria. Pp IV-4-1-4-8.

24. Kreiner, I; Zirath, S. y Salas, V. 1994. Diseño y resultados preliminares de un filtro biológico con plantas y suelo. Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azapotalco. México, D.F.
25. Kreiner, I. 1995. Sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales -sistemas de suelo con plantas-. Memorias del segundo Minisimposio Internacional sobre remoción de contaminantes de aguas y suelos. México. Pp 110-119
26. Levenspiel, O. 1991. Ingeniería de las reacciones químicas. Ed. Reverté. México, D.F. Cap. 9. Pp.277-347.
27. Luna-Pabello, V.M; Durán, C; Ramírez, H; Fenoglio, F. y Sánchez, H. 1997. Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química, San Luis Argentina. Pp 51-56.
28. Marsh, N; Moore, J.A; Roser, D. y Bavor, J. 1994. Hydraulic parameters and monitoring plan for a constructed wetland. Center for Wastewater Treatment, Civil Engr. Dept., Univ of New South Wales, Sydney, Australia. Pp. 237-244.
29. Marsteiner, E. y Collins, A. 1995. The influence of macrophytes on subsurface flow wetland (SSF) hydraulics. 5th International Conference on Wetland systems for Water Pollution Control. Viena. Austria. Pp II- 2-1-2-7.
30. Martin, C. D. y Johnson, K. D. 1995. The use of Extended Aeration and in-series Surface-Flow Wetlands for Landfill Leachate Treatment. Water Research, Vol. 32, No. 3, Pp. 119-128.
31. Metcalf y Eddy. 1991. Wastewater Engineering. McGraw Hill International Editions. E.U.A. Volumen I.

32. Metcalf y Eddy. 1996. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Editorial Mc Graw Hill. Vol.II, 1ª edición en español. Pp. 865-917.
33. Morgan-Sagastume, J; Jiménez, B. y Noyola, A. 1997. Un nuevo índice para la interpretación de las curvas de distribución de tiempos de residencia en tanques para el tratamiento del agua. Memorias Técnicas XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Pp.98-111.
34. Mugica, V. y Figueroa, J. 1996. Contaminación Ambiental, causas y control. Editado por la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. México, D.F. Pp. 32-37.
35. Nacional Academy of Sciences. 1995. El Suministro de agua de la ciudad de México. Mejorando la sustentabilidad. <http://lanic.utexas.edu/la/México/water/libro.html>
36. National Research Council. 1994. <http://lanic.utexas.edu/la/México/water/libro/nationres.html>.
37. Netter, R. y Behrens, H. 1992. Application of different water tracers for investigation of constructed wetlands hydraulics. Tracer hydrology. Höltz & Werner (eds). Balkema, Rotterdam. Pp.125-128.
38. Netter, R. 1995 Flow characteristics of Planted Soil Filters. Water Science and Technology, Vol 29, N0.4, Pp.37-44
39. Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas residuales - Muestreo. Diario Oficial de la Federación, marzo 25 de 1980.

40. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, enero 6 de 1997.
41. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos. Diario Oficial de la Federación, septiembre 21 de 1998.
42. Norero, A. 1986. La Evapotranspiración de los cultivos, aspectos agrofísicos. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.
43. Ramírez C, H. 1998. Tesis de licenciatura: Desarrollo de la Ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. UNAM. México, D.F.
44. Rash, J. K. y Liehr, S. K. 1995. Flow pattern analysis of constructed wetlands treating landfill leachate. Department of Civil Engineering, North Caroline State University, Raleigh, NC. 27695-7908 EUA.
45. Reed, S. C. 1992. Constructed wetland design-the first generation. Water Environment Research 64 (6) . Pp.776-782.
46. Rivera, F. 1994. Tratamiento de aguas residuales por el método de la zona de la raíz (Humedales de plantas acuáticas), Sistema de información sobre proyectos de investigación. Sede de la investigación, ENEP Iztacala, UNAM. Pp. 2-5.
47. Rivera, F; Warren, A; Curds, C; Robles, E. y Gutiérrez, A. 1996. The Application of the root zone method for the treatment and reuse of high-strenght abbatoir waste in Mexico. Sede de la investigación, ENEP Iztacala UNAM. 5th International Conference on Wetland systems for Water Pollution Control. Viena. Austria. Pp X- 4-1-4-8.

-
48. -Romero, A H; García, O J y Janetti, D J, "Las vicisitudes de las plantas de tratamiento de aguas residuales en México", *Ingeniería Civil* 330 (1996), 12-18.
 49. Schierup, H-H; Brix, H. y Lorenzen, B. 1990. wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark- State of the Art. Botanical Institute, Aarhus University, Risskov, Denmark. In *Constructed Wetlands, Advances in Water Pollution Control*. Edited by P.F. Cooper and B.C. Findlater. Inglaterra. Pp. 495-504.
 50. Smith, J.M. 1993. *Ingeniería de la cinética química*. Ed. CECSA. México, D.F. Capítulo 6. Pp.317-346.
 51. Stairs, D. B. y Moore, A. J. 1996. Flow characteristics of constructed wetlands: tracer studies of the hydraulic regime. *Bioresource Engr. Dept., Oregon State University*. EUA. Pp. 742-750.
 52. Vyacheslav. G. M. 1996. Combined systems of constructed wetlands in cis: the first ten years. *5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Viena. Austria. Pp X-10-1-10-7.

ANEXO 1

TABLA GENERAL DE BALANCE HÍDRICO

Resultados del balance global hidrico
TABLA GENERAL DE BALANCE HIDRICO

Fecha	GLOBAL		PRECIPITACIÓN PLUVIAL			EVAPOTRANSPIRACIÓN				TRH (Días)	T amb °C
	Entrada (m³/d)	Salida (m³/d)	Entrada - Salida	Lluvia en mm	Volumen de precipitación (pluviómetro) (m³/d)	Volumen de precipitación en el humedal (m³/d)	Evapotranspiración experimental (cm)	Volumen de evapotranspiración experimental (m³/d)	Volumen de evapotranspiración en el humedal (m³/d)		
15-Jul-98			0	0.6	1.88E-05	0.05	0.30	1.48E-04	0.02	0.02	22
23-Jul-98	5.1	5.4	-0.3	3.6	1.13E-04	0.27	0.40	1.98E-04	0.03	-0.06	23.8
24-Jul-98	4.48	4.353	0.127	0.55	1.73E-05	0.04	0.20	9.88E-05	0.02	0.15	20.2
25-Jul-98	5.47	4.695	0.775	1.7	5.34E-05	0.13	0.34	1.68E-04	0.03	0.88	23
26-Jul-98	4.16	4.737	-0.577	2.1	6.60E-05	0.16	0.40	1.98E-04	0.03	-0.45	23.5
30-Jul-98	5.17	5.2	-0.03	9.2	2.89E-04	0.69	0.30	1.48E-04	0.02	0.64	22
31-Jul-98	3.14	4.14	-1	4.8	1.51E-04	0.36	0.30	1.48E-04	0.02	-0.66	23
03-Ago-98	6.27	7.659	-1.389	0	0.00E+00	0.00	0.20	9.88E-05	0.02	-1.40	21
10-Ago-98	4.14	4.65	-0.51	10.3	3.24E-04	0.77	0.20	9.88E-05	0.02	0.25	19.5
11-Ago-98	0		0	9.2	2.89E-04	0.69	0.23	1.14E-04	0.02	0.67	21
13-Ago-98	0		0	2.3	7.23E-05	0.17	0.15	7.41E-05	0.01	0.16	19
14-Ago-98	2.38	3.21	-0.83	11.5	3.61E-04	0.86	0.16	7.91E-05	0.01	0.02	20
17-Ago-98	1.96	2.275	-0.315	18.8	5.91E-04	1.41	0.10	4.94E-05	0.01	1.09	11.02
18-Ago-98	0		0	18.5	5.81E-04	1.39	0.24	1.19E-04	0.02	1.37	19.5
19-Ago-98	0	0.842	-0.842	9.1	2.86E-04	0.68	0.16	7.91E-05	0.01	-0.17	20
21-Ago-98			0	1.4	4.40E-05	0.11	0.10	4.94E-05	0.01	0.10	18
02-Sep-98	0.95	1.166	-0.216	3.9	1.23E-04	0.29	0.19	9.39E-05	0.01	0.06	22.74
10-Sep-98	0	0.572	-0.572	9	2.83E-04	0.68	0.25	1.24E-04	0.02	0.08	18.5
11-Sep-98	0	1.333	-1.333	0	0.00E+00	0.00	0.14	6.92E-05	0.01	-1.34	17
23-Sep-98	0.35	1.465	-1.115	0.2	6.28E-06	0.02	0.18	8.89E-05	0.01	-1.11	61.71
24-Sep-98	0.57	0.431	0.139	9.7	3.05E-04	0.73	0.21	1.04E-04	0.02	0.85	37.89
25-Sep-98	5.18	5.317	-0.137	26.6	8.36E-04	2.00	0.21	1.04E-04	0.02	1.84	4.17
30-Sep-98	0	1.499	-1.499	6.1	1.92E-04	0.46	0.24	1.19E-04	0.02	-1.06	18
02-Oct-98	1.72	0.322	1.398	11.4	3.58E-04	0.86	0.25	1.24E-04	0.02	2.23	12.56
03-Oct-98	3.4	3.813	-0.413	10.5	3.30E-04	0.79	0.16	7.91E-05	0.01	0.36	6.35
04-Oct-98		36.62	-36.62	9	2.83E-04	0.68	0.15	7.41E-05	0.01		21
12-Oct-98	1.71	1.62	0.09	4	1.26E-04	0.30	0.28	1.38E-04	0.02	0.37	12.63
14-Oct-98			0	29.5	9.27E-04	2.21	0.16	7.91E-05	0.01	2.20	20

Resultados del balance global hídrico
TABLA GENERAL DE BALANCE HÍDRICO

GLOBAL			PRECIPITACIÓN PLUVIAL			EVAPOTRANSPIRACIÓN						
Fecha	Entrada (m ³ /d)	Salida (m ³ /d)	Entrada - Salida	Lluvia en mm	Volumen de precipitación (pluviómetro m ³ /d)	Volumen de precipitación en el humedal(m ³ /d)	Evapotrans- piración experimental (cm)	Volumen de evapotrans- piración experimental (m ³ /d)	Volumen de evapotranspiración en el humedal (m ³ /d)	Acumulación	TRH (Días)	T amb °C
28-Oct-98	0.75	0.537	0.213	0	0.00E+00	0.00	0.20	9.88E-05	0.02	0.20	28.80	19
30-Oct-98	3.86	3.52	0.34	0	0.00E+00	0.00	0.25	1.24E-04	0.02	0.32	5.60	22
31-Oct-98	0.3	0.78	-0.48	0	0.00E+00	0.00	0.16	7.91E-05	0.01	-0.49	72.00	20
03-Nov-98	0.57	0.571	-0.001	0	0.00E+00	0.00	0.16	7.91E-05	0.01	-0.01	37.89	20
04-Nov-98	3.21	1.884	1.326	0	0.00E+00	0.00	0.18	8.89E-05	0.01	1.31	6.73	21
05-Nov-98	3.15	3.415	-0.265	0	0.00E+00	0.00	0.20	9.88E-05	0.02	-0.28	6.86	19
06-Nov-98	2.96	2.466	0.494	0	0.00E+00	0.00	0.30	1.48E-04	0.02	0.47	7.30	21
07-Nov-98	3.3	2.21	1.09	0	0.00E+00	0.00	0.35	1.73E-04	0.03	1.06	6.55	23
09-Nov-98	2.58	1.8	0.78	0	0.00E+00	0.00	0.33	1.63E-04	0.02	0.76	8.37	22
10-Nov-98	3.06	2.88	0.18	9.8	3.08E-04	0.74	0.25	1.24E-04	0.02	0.90	7.06	21
11-Nov-98	2.095	1.844	0.251	0	0.00E+00	0.00	0.16	7.91E-05	0.01	0.24	10.31	20
12-Nov-98	1.73	2.134	-0.404	0	0.00E+00	0.00	0.30	1.48E-04	0.02	-0.43	12.49	22
13-Nov-98	3.25	2.066	1.184	0	0.00E+00	0.00	0.35	1.73E-04	0.03	1.16	6.65	22
15-Nov-98	4.64	3.438	1.202	0	0.00E+00	0.00	0.34	1.68E-04	0.03	1.18	4.66	21
17-Nov-98	3.797	3.551	0.246	0.4	1.26E-05	0.03	0.16	7.91E-05	0.01	0.26	5.69	20
18-Nov-98	2.833	1.6	1.233	0	0	0	0.32	1.58E-04	0.02	1.21	7.62	22
19-Nov-98			0	0	0	0	0.20	9.88E-05	0.02	-0.02		18
20-Nov-98	3.02	2.52	0.5	0	0	0	0.24	1.19E-04	0.02	0.48	7.15	21
22-Nov-98	2.695	1.913	0.782	0	0	0	0.16	7.91E-05	0.01	0.77	8.01	20
23-Nov-98	2.71	2.14	0.57	0	0	0	0.28	1.38E-04	0.02	0.55	7.97	22
24-Nov-98	3.02	3	0.02	0	0	0	0.30	1.48E-04	0.02	0.00	7.15	22
27-Nov-98	2.495	1.761	0.734	0	0	0	0.31	1.53E-04	0.02	0.71	8.66	21
28-Nov-98	4.18	3.826	0.354	0	0	0	0.32	1.58E-04	0.02	0.33	5.17	21
01-Dic-98	1.58	0.95	0.63	0	0	0	0.32	1.58E-04	0.02	0.61	13.67	23
03-Dic-98	2.09	1.335	0.755	0	0	0	0.16	7.91E-05	0.01	0.74	10.33	20
06-Dic-98	1.523	1.22	0.303	0	0	0	0.24	1.19E-04	0.02	0.29	14.18	18
12-Dic-98	1.36	1.05	0.31	0	0	0	0.23	1.14E-04	0.02	0.29	15.88	18
18-Dic-98	1.0833	0.827	0.2563	0	0	0	0.20	9.88E-05	0.02	0.24	19.94	17

Resultados del balance global hídrico
TABLA GENERAL DE BALANCE HÍDRICO

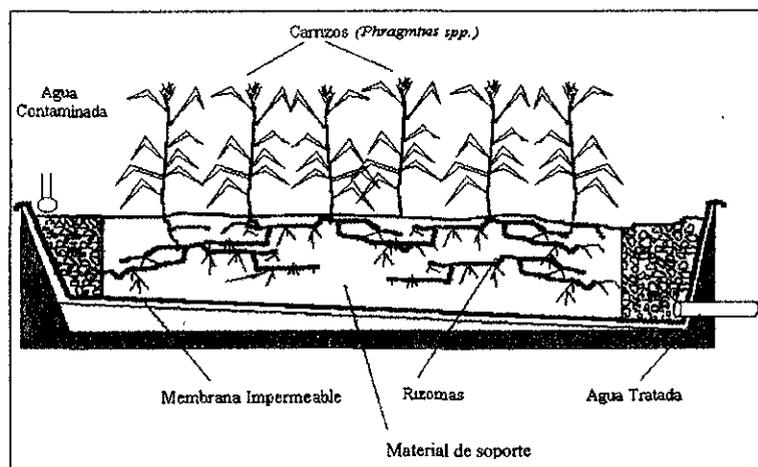
Fecha	GLOBAL			PRECIPITACIÓN PLUVIAL			EVAPOTRANSPIRACIÓN				TRH (Días)	T amb °C
	Entrada (m ³ /d)	Salida (m ³ /d)	Entrada - Salida	Lluvia en mm	Volumen de precipitación (pluviómetro) (m ³ /d)	Volumen de precipitación en el humedal (m ³ /d)	Evapotranspiración experimental (cm)	Volumen de evapotranspiración experimental (m ³ /d)	Volumen de evapotranspiración en el humedal (m ³ /d)	Acumulación		
20-Dic-98	1.59	0.941	0.649	0	0	0	0.30	1.48E-04	0.02	0.63	13.58	19
23-Dic-98	1.103	1.1	0.003	0	0	0	0.10	4.94E-05	0.01	0.00	19.58	17
24-Dic-98	1.36	0.816	0.544	0	0	0	0.10	4.94E-05	0.01	0.54	15.88	16
26-Dic-98	1.26	1.37	-0.11	0	0	0	0.20	9.88E-05	0.02	-0.13	17.14	18
28-Dic-98	1.265	0.99	0.275	0	0	0	0.34	1.68E-04	0.03	0.25	17.08	19
30-Dic-98	1.065	0.9435	0.1215	0	0	0	0.24	1.19E-04	0.02	0.10	20.28	21
02-Ene-99	1.14	0.881	0.259	0	0	0	0.15	7.41E-05	0.01	0.25	18.95	18
04-Ene-99	0.97	0.837	0.133	0	0	0	0.15	7.41E-05	0.01	0.12	22.27	17
06-Ene-99	0.88	0.7595	0.1205	0	0	0	0.20	9.88E-05	0.02	0.11	24.55	17
07-Ene-99	0.89	0.634	0.256	0	0	0	0.10	4.94E-05	0.01	0.25	24.27	15
09-Ene-99	3.65	2.33	1.32	0	0	0	0.20	9.88E-05	0.02	1.31	5.92	16
11-Ene-99	3.07	2.55	0.52	0	0	0	0.30	1.48E-04	0.02	0.50	7.04	17
20-Ene-99			0	0	0	0	0.21	1.04E-04	0.02	-0.02		19
23-Ene-99	4.93	2.316	2.614	0	0	0	0.16	7.91E-05	0.01	2.60	4.38	20
25-Ene-99	4.48	3.41	1.07	0	0	0	0.15	7.41E-05	0.01	1.06	4.82	15
27-Ene-99	3.12	2.496	0.624	0	0	0	0.25	1.24E-04	0.02	0.61	6.92	22
28-Ene-99	4.27	3.752	0.518	0	0	0	0.30	1.48E-04	0.02	0.50	5.06	23
02-Feb-99	3.55	3.456	0.094	0	0	0	0.29	1.43E-04	0.02	0.07	6.08	22
04-Feb-99	3.45	3.102	0.348	0	0	0	0.30	1.48E-04	0.02	0.33	6.26	22
07-Feb-99	3.213	2.943	0.27	0	0	0	0.20	9.88E-05	0.02	0.26	6.72	21
10-Feb-99	3.37	3.3	0.07	0	0	0	0.30	1.48E-04	0.02	0.05	6.41	21
12-Feb-99	4.22	3.38	0.84	0	0	0	0.22	1.09E-04	0.02	0.82	5.12	22
14-Feb-99	4.08	3.658	0.422	0	0	0	0.25	1.24E-04	0.02	0.40	5.29	23
17-Feb-99	2.625	2.219	0.406	0	0	0	0.28	1.38E-04	0.02	0.39	8.23	23

ANEXO 2

MANUAL DE OPERACIÓN
Y
MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL PLANTA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



VIVERO FORESTAL DE COYOACÁN
MEXICO D.F.
DICIEMBRE DE 1999

OBJETIVOS DEL MANUAL:

Es indispensable que tanto el operador como los responsables designados tengan conocimiento de los diferentes procesos que ocurren en el sistema de tratamiento de aguas residuales, con lo cual una buena operación y un mejor mantenimiento garantizarán la calidad esperada del agua tratada. De no ser así, se corre el riesgo de hacer fallar el sistema, esto es, la eficiencia esperada se puede ver reducida drásticamente.

OBJETIVOS DE LA OPERACIÓN Y DEL MANTENIMIENTO

- a) Optimizar el funcionamiento del sistema, de manera que se obtenga un efluente con la calidad esperada, desde el punto de vista del contenido de materia orgánica y de microorganismos, especialmente los patógenos.
- b) Minimizar la producción de olores desagradables
- c) Mantener constantemente aseado el sistema para que éste presente siempre un aspecto agradable, tanto para los que laboran en él, como para el público que habita en las cercanías de la planta.

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

A continuación se presenta el programa de mantenimiento propuesto para el humedal artificial de flujo horizontal ubicado dentro de los viveros de Coyoacán.

Primero se muestra una tabla con las actividades a realizar durante los paros programados y la frecuencia con la que deben realizarse.

Posteriormente se describen las tareas por cada zona o sección del sistema, abarcando todo el tren de tratamiento y todos los equipos existentes.

FRECUENCIA	ACTIVIDAD
DIARIO	Revisión de la operación Distribución adecuada del influente Alimentación adecuada, según los volúmenes e intervalos propuestos
MENSUAL	Revisión y servicio a los dispositivos de bombeo y control Limpieza de fosas o tanques de sedimentación Limpieza de tuberías y mallas de retención de sólidos Limpieza de cisterna de almacenamiento Retiro de vegetación extraña y hojas secas presentes en la superficie del humedal
TRIMESTRAL	Servicio a los dispositivos y equipos mecánicos Cambio de las partes afectadas por abrasión Revisión de los dispositivos de alimentación y drenado Limpieza a los tubos muestreadores ubicados dentro del humedal
ANUAL	Regulación del nivel de agua en el lecho Revisión y poda de la vegetación y retiro de las especies muertas

Las actividades diarias pueden realizarse con un solo operador, pero las demás es recomendable que las hagan dos personas, y que se lleve un control en la bitácora de mantenimiento.

Las zonas se dividieron de la siguiente forma:

1. Zona de suministro de energía eléctrica
2. Zona de suministro de agua cruda
3. Tratamiento primario
4. Zona de alimentación al humedal
5. Tratamiento biológico
6. Zona del efluente

De cada zona se describen los equipos que la integran, la forma en que operan, las actividades o tareas para darles servicio y el material o herramienta necesaria para llevarlas a cabo.

ZONA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

1. Caja de registro principal (T-100)

Marca SQUARE D

NEMA 4

Se encuentra ubicada a un costado del río Magdalena, sobre la pared de una caseta de control de DGCOH.

Recibe la acometida con 120 VCA y de ahí se distribuye a todo el sistema.

2. Caja de registro secundaria (T-200)

Marca Royal

NEMA 4

Se localiza en la zona del efluente, recibe corriente de la caja principal para la bomba que conduce al agua tratada y almacenada en la cisterna hacia el canal de riego del vivero.

Mantenimiento

Las instalaciones eléctricas se deben revisar mensualmente de la siguiente forma:

- a) Fusibles; no deben estar húmedos ni quemados.
- b) Cables; deben estar bien aislados, conectados y en general en buen estado.
- c) Cajas de registro; no deben estar oxidadas ni expuestas a mucha humedad.

ZONA DE SUMINISTRO DE AGUA CRUDA

1. Bomba de alimentación (BA-001).

Electrobomba sumergible para aguas negras Barmesa de México, S.A.

0.4 HP

radio de esfera de 1 ½"

Función: Enviar el flujo de agua cruda a la fosa séptica o sedimentador.

Fluido que conduce: agua residual mixta, principalmente de tipo doméstico, con alto contenido de sólidos sedimentables.

Tiempo de operación: lapsos de 2.5 minutos cada hora y media, aproximadamente.

Tiene dos dispositivos de control, está conectada a un indicador controlador de nivel (LIC-001) localizado en la fosa séptica, el cual al registrar bajo nivel acciona el motor de la bomba y a un interruptor local por bajo nivel, tipo flotador, colocado dentro del río y junto a la bomba.

2. Interruptor de nivel (LSL-001).

Tipo flotador

120 VCA

Función: Interrumpir el paso de corriente eléctrica a la bomba de alimentación al detectar bajo nivel en el agua del río Magdalena y así evitar que cavite.

3. Jaula – criba

Estructura metálica de alambión tipo criba de 0.05 m de diámetro de partícula, 1.5 m de altura, 0.75 m de largo y 0.50 m de ancho, con recubrimiento de pintura antioxidante.

Función: Proteger a la bomba de alimentación y evitar el paso de sólidos de gran tamaño.

Cubre completamente a la bomba, está sumergida en el río y sujeta a las paredes del mismo. Está cubierta de una malla de plástico fino con un diámetro de partícula de 0.001 m.

La tubería de alimentación es de PVC rígido, de 2" y 3.5" de diámetro. Existe una bifurcación después de la bomba y una llave para toma de muestra. Hay dos válvulas de corte, manuales, tipo bola.

Se colocó una tuerca unión en la tubería que baja hacia el río, en caso de que se necesite desmontar la bomba (ver figura A).

Material y herramienta necesaria para el mantenimiento:

- Cepillo o escoba
- Cubetas
- Solución de hipoclorito de sodio al 5%
- Guantes de protección
- Lentes de seguridad
- Overol o ropa adecuada para la limpieza.
- Botas de hule y/o pantalón de hule.

Mantenimiento

- a. Interrumpir la corriente de energía eléctrica de alimentación principal al sistema (caja de registro).
- b. Abrir la reja de protección a la llave de toma de muestra y desconectar el cable de la bomba de la toma de corriente ubicada en la parte inferior de la tubería.
- c. Bajar al río para limpiar la bomba y la jaula-criba.
- d. Retirar con un cepillo o escoba lo que está pegado a la malla de plástico y lo acumulado dentro de ésta.
- e. Enjuagar perfectamente hasta que la bomba y la rejilla se vean libres de lodo y basura.

La inspección que se realiza a la bomba debe de cuidar los siguientes aspectos:

1. Cojinetes, calentamiento y ruidos
2. Motores, velocidad de operación
3. Operación de bombeo, vibraciones y ruidos
4. Sello mecánico, goteo excesivo

En caso de que sea necesario desmontar la bomba para darle servicio o por alguna falla se hará de la siguiente manera:

- a. Interrumpir la corriente de energía eléctrica de alimentación principal al sistema (caja de registro).
- b. Abrir la reja de la toma de muestra y desconectar el cable de la bomba.
- c. Desatornillar la tuerca unión para liberar el tubo de succión.
- d. Levantar la tapa superior de la jaula-criba.
- e. Con la ayuda de un cable o cuerda resistente, no por el tubo, sacar la bomba de la jaula-criba, subirla y colocarla en el piso.
- f. Darle el mantenimiento correspondiente a la bomba

- g. Se puede aprovechar la ocasión para cambiar la malla plástica de la jaula-criba, levantándola con el cable o cuerda y cuidando que la nueva malla cubra perfectamente toda el área de la jaula.

Es importante que al terminar el mantenimiento se lave todo el material y herramienta utilizada y se prepare una solución de hipoclorito de sodio al 5% para enjuagarse las manos.

TRATAMIENTO PRIMARIO

1. Fosa séptica o tanque sedimentador

Fosa séptica prefabricada a base de fibrocemento reforzado de tipo cilindro vertical de una mampara, con una capacidad nominal de 1.848 m³ y una capacidad de operación de 1500m³. Cuenta con un dispositivo automático, un interruptor de alto y bajo nivel, que manda la señal de paro y/o arranque a la bomba de alimentación.

Función: Reducir el contenido de sólidos sedimentables, es decir no solubles y suspendidos, para prevenir la formación de bancos de lodo y reducir la DBO en el agua para prepararla para un tratamiento posterior o para disposición final.

El agua es bombeada hacia la fosa y se introduce a esta a través de una boquilla de 12.6 cm de diámetro cubierta por una malla plástica que detiene parte de los sólidos y evita que se sature rápidamente el sedimentador.

2. Interruptor de nivel LSL-001

Tipo flotador

120 VCA

Función: Es un dispositivo de control de nivel tipo flotador de dos posiciones a y b, paro y arranque de bomba respectivamente. En a se indica que el nivel es mínimo y se

acciona la bomba BA-001 para proceder al llenado de la fosa séptica. La posición b se alcanza cuando el nivel de agua en la fosa llegó al máximo y se manda la señal de paro de bomba.

3. Mallas plásticas de protección

Malla de PVC flexible, con un diámetro de partícula de 0.001m.

Función: Evitar el paso de sólidos y lodo, no detenidos en la zona de suministro de agua cruda, para eficientar el tratamiento de sedimentación y evitar la saturación de sólidos en el tanque.

Material y herramienta necesaria para el mantenimiento:

- Motobomba para sacar lodos (facilitada por el personal de los viveros, previo aviso.)
- Gasolina para la motobomba
- Cuchara larga para lodos o asadón
- Cepillo o escoba
- Cubetas
- Solución de hipoclorito de sodio al 5%
- Guantes de protección
- Cubrebocas
- Lentes de seguridad
- Overol o ropa adecuada para la limpieza.
- Botas y/o pantalón de hule.

Los pasos a seguir para dar el mantenimiento necesario son:

- a) Verificar que no haya paso de corriente eléctrica.
- b) Colocar la motobomba lo más cerca posible de la fosa.

- c) Meter la manguera de succión a la fosa, y la de descarga llevarla hacia el sitio de disposición de lodos (figura A-1).
- d) Verificar que el tanque de gasolina de la motobomba esté lleno.
- e) Accionar la motobomba y remover el agua de la fosa para remover los lodos con una cuchara para lodos o un asadón , de este modo se procura que no se queden estancados.
- f) Las paredes de la fosa se deben cepillar y enjuagar para desprender el lodo pegado a ellas.
- g) Si todavía hay presencia de lodos en el fondo del tanque, se debe proceder a sacarlos con la cuchara y colocarlos en algún recipiente para, posteriormente, llevarlos al sitio de disposición final.
- h) Desmontar las mallas plásticas de las boquillas y cepillarlas para eliminar el lodo acumulado.
- i) Enjuagar las mallas perfectamente y volver a colocarlas
- j) Revisar que el dispositivo de control de nivel esté en su sitio.

Notas:

Se recomienda que la limpieza de la fosa séptica sea mensual y la de las mallas plásticas se realice semanalmente o cuando la cantidad de lodo y sólidos acumulados sea evidentemente considerable. Para tal efecto se deben llevar a cabo los pasos de la h) a la j).

Es importante que al terminar el mantenimiento se lave todo el material y herramienta utilizada y se prepare una solución de hipoclorito de sodio al 5% para enjuagarse las manos.

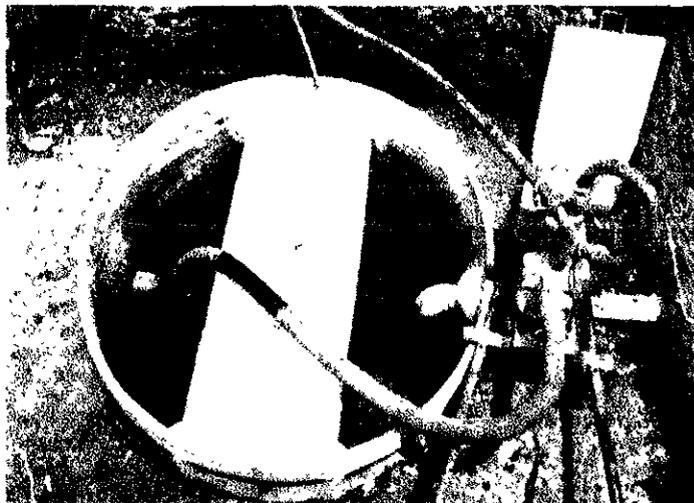


Figura A-1. Mantenimiento de la fosa séptica.

ZONA DE ALIMENTACIÓN AL HUMEDAL

1. Medidor de flujo FE-001

Medidor de flujo de tipo desplazamiento positivo marca Kent.

Cuerpo de bronce de $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

Función: Medir el flujo volumétrico instantáneo y acumulado que se alimenta al humedal.

El medidor se encuentra ubicado dentro de un registro a la salida de la fosa séptica (figura A-3). Está montado sobre una tubería de PVC rígido de $1\frac{1}{2}$ " y antes de él se localiza una válvula manual de cierre hermético tipo bola que corta el paso del agua de la fosa al humedal, una tuerca unión que lo conecta a la tubería y una te para facilitar la limpieza del tubo.

2. Tubos distribuidores

Tubería de PVC rígido de $1\frac{1}{2}$ " de diámetro

Función: Conducir ,de forma continua y por gravedad, el agua que sale de la fosa séptica hacia el humedal.

Existe un tubo o cabezal principal que se une a un distribuidor con cuatro tubos de PVC rígido, repartidos equitativamente a lo ancho del humedal. La salida de los tubos se encuentra aproximadamente a 15-20 cm arriba del lecho con el propósito de oxigenar el agua, y cae sobre unas láminas rectangulares de PVC que distribuyen uniformemente el flujo en el lecho (Figura A-2).

Material y herramienta necesaria para el mantenimiento:

- Manguera
- Cubeta
- Cepillo y/o escobillones de preferencia largos
- Solución de hipoclorito de sodio al 5%
- Guantes de protección
- Cubrebocas
- Lentes de seguridad
- Overol o ropa adecuada para la limpieza.
- Llave steelson

Los pasos a seguir para dar el mantenimiento necesario son:

- a) Cerrar perfectamente la válvula de paso
- b) Quitar la tapa de la te para limpieza
- c) Agregar agua a presión en el orificio superior de la te con la manguera o con una cubeta para que se distribuya por toda la tubería.
- d) Introducir el escobillón hacia ambos lados del tubo para remover el lodo acumulado en las paredes.
- e) Adicionar más agua, hasta ver que por los tubos distribuidores ya no se expulsan lodos.

- f) Quitar las tapas de los tubos distribuidores y tallar con el escobillón todas las salidas de los mismos.
- g) Enjuagar perfectamente.
- h) Con la escoba o cepillo, tallar las láminas rectangulares de PVC para quitar los residuos de lodo.
- i) Colocar nuevamente todas las tapas.

Se recomienda que el mantenimiento sea mensual, pero en caso de tener problemas de obstrucción por sólidos se realizará cuando sea requerido.

En caso de que la obstrucción sea en el medidor se procederá de la siguiente manera:

- a) Seguir los pasos a) a d) del punto anterior
- b) Desatornillar la tuerca unión y, con la ayuda de una llave steelson o un perico, desmontar el medidor del tubo.
- c) Se le adiciona agua a presión hasta que se elimine el material pegado y se enjuaga perfectamente.
- d) Se vuelve a colocar en el tubo.
- e) Se calibra.

Nota:

El medidor instalado en el sistema no es el más adecuado para aguas residuales, por lo que se obstruye con mucha frecuencia, se hizo la propuesta de cambiarlo, pero mientras eso sucede se le tiene que dar mantenimiento correctivo cada vez que el flujo disminuya en forma considerable.

La calibración del medidor se debe de hacer cada mes, se puede hacer midiendo volumen en un determinado lapso de tiempo y compararlo con el registrado en el aparato.

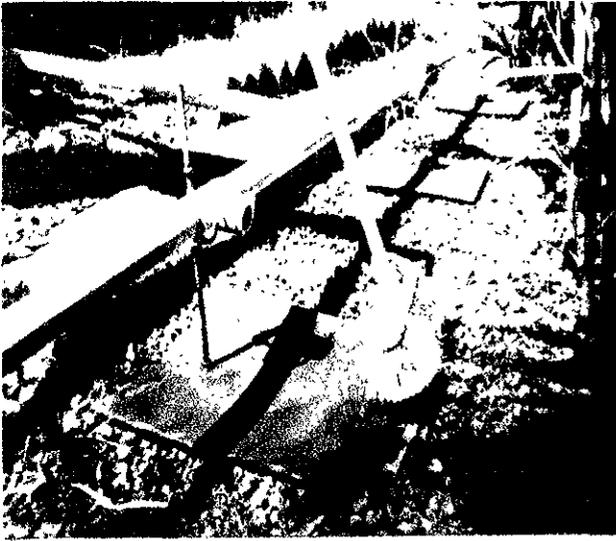


Figura A-2. Limpieza de tubos distribuidores

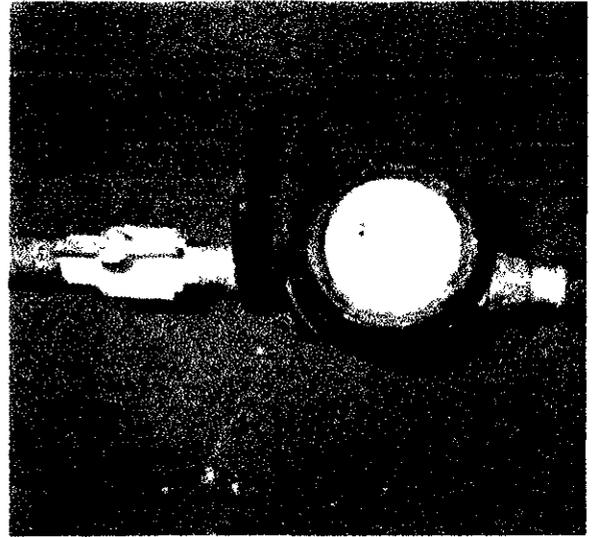


Figura A-3. Medidor de flujo FE-001

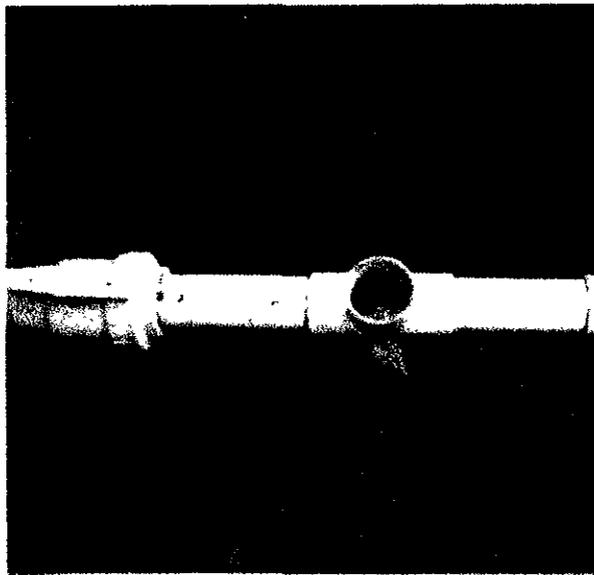


Figura A-4. "Te" para dar mantenimiento a la tubería del medidor FE-001

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

1. Humedal artificial de flujo horizontal, HAFH-120

Sistema piloto de forma rectangular con una área de 75 m², protegido por una geomembrana impermeable. Consta de un lecho de escoria volcánica de diferente tamaño y de plantas vasculares emergentes, específicamente carrizos y papiros de pantano.

Función: Es donde se lleva a cabo el tratamiento biológico y está diseñado para tratar un volumen promedio de 5.6 metros cúbicos diarios. La alimentación es de tipo continuo y el tiempo de residencia hidráulico teórico es de 1.8 días.

El tratamiento se lleva a cabo mediante la actividad bioquímica de microorganismos y vegetales distribuidos en el lecho; el agua circula a través de ellos y se va depurando.

Como el flujo no sale a la superficie, y por lo tanto no genera mosquitos ni malos olores, el mantenimiento del humedal es muy sencillo y económico.

Material y herramienta necesaria para el mantenimiento:

- Guantes de protección
- Cubrebocas
- Lentes de seguridad
- Overol o ropa adecuada para la limpieza.
- Botas de hule y/o pantalón de hule.
- Tijeras de jardín
- Machete
- Pala

Las actividades de mantenimiento son:

- a) Colocar un tablón de madera sobre el lecho, a manera de puente, para evitar pisar directamente el material de soporte y apisonarlo.
- b) Quitar todas las hierbas extrañas que crezcan dentro del sistema, si su raíz no es muy profunda se pueden arrancar manualmente, de otro modo se debe remover muy cuidadosamente el material de soporte superficial para no alterar la conductividad del mismo.
- c) Remover las hojas secas que caigan dentro del sistema para evitar que los nutrientes contenidos en ellas se reintegren al lecho.
- d) Remover con un escobillón largo los lodos acumulados dentro de los tubos muestreadores.
- e) Revisar que la geomembrana no presente cuarteaduras o rasgaduras que permitan la infiltración del agua.
- f) Retirar aquellas plantas que se vean en mal estado o enfermas y sustituirlas por otras, ya sea mediante la propagación de las mismas o plantando una nueva.
- g) Revisar que no haya presencia de plagas o animales que ataquen a la vegetación, de ser así se deben retirar lo más pronto posible, tratando de no utilizar agentes químicos que puedan incorporarse al sistema.
- h) Podar o incinerar los carrizos cuando hayan alcanzado su tamaño definitivo.

Se recomienda que los pasos del a) al g) se realicen mensualmente.

ZONA DEL EFLUENTE

1. Cisterna de almacenamiento C-140

Celda rectangular con una capacidad de aproximadamente 2m³.

Función almacenar el agua tratada, de donde será enviada por la bomba BA-002 hacia el canal de riego.

En una de las paredes se puede apreciar el nivel, de acuerdo a la altura que alcanza el agua, en una regleta pintada en la cisterna y en la parte superior derecha se encuentra localizada la “bomba de salida”, asentada sobre una repisa metálica. Tiene un dispositivo de control de nivel (LSL-002), que hace la función de un interruptor de paro-arranque de bomba.

2. Interruptor de nivel LSH-002

Tipo flotador

120 VCA

Función: Es un dispositivo de control de nivel tipo flotador, normalmente abierto, de simple polo doble tiro, para paro y arranque de bomba. Cuando el nivel en la cisterna es máximo, se acciona la bomba BA-001 para enviar el agua tratada al canal de riego, y para hasta que el nivel de agua en la cisterna sea mínimo.

3. Dispositivo de control de nivel de agua en el humedal.

Es un tubo flexible, colocado tipo sifón, mediante el cual el agua entra a la cisterna y hace posible controlar el nivel de agua dentro del humedal para cumplir con el tiempo de residencia hidráulico establecido.

5. Bomba de salida del efluente (BA-002).

0.25 HP

Función: Enviar el agua tratada al canal de riego del vivero.

Fluido que conduce: agua tratada.

Tiempo de operación: lapsos de 1 hora cada tres horas, aproximadamente.

Funciona cuando recibe una señal de alto nivel de un indicador tipo interruptor, y se detiene al llegar al mínimo nivel permitido.

Se encuentra localizada dentro de la cisterna de almacenamiento C-140, fija sobre una repisa metálica en la parte superior de la cisterna. A un costado de ella se ubica una caja de registro de energía eléctrica T-200, para cortar rápidamente el paso de corriente en caso de que se requiera.

6. Medidor de flujo FE-002

Medidor de flujo de tipo desplazamiento positivo marca Azteca.

Cuerpo de bronce de ¾" de diámetro.

$\Delta P=1$ bar.

Función: Medir el flujo volumétrico, instantáneo y acumulado, de agua tratada que sale de la cisterna hacia el canal de riego.

El medidor se encuentra ubicado a la salida de la cisterna de almacenamiento. Está montado sobre una tubería de PVC rígido de ½" y después de él, se localiza una válvula manual de cierre hermético tipo bola que corta el paso del agua y otra que lo desvía hacia una ramal para riego local de las plantas de ornato que rodean al sistema.

Material y herramienta necesaria para el mantenimiento:

- Cepillo o escoba
- Cubetas
- Trapo o jerga
- Solución de hipoclorito de sodio al 5%
- Guantes de protección
- Lentes de seguridad
- Overol o ropa adecuada para la limpieza.
- Botas de hule y/o pantalón de hule.

El mantenimiento para esta zona incluye:

- a) Verificar que no haya paso de corriente eléctrica
- b) Subir el tubo flexible para no permitir que pase más agua a la cisterna
- c) Con ayuda de la bomba, sacar toda el agua que sea posible, cuidando que el nivel no llegue más debajo de la pichancha
- d) Sacar el agua restante utilizando cubetas o algún otro recipiente
- e) Cepillar las paredes de la cisterna para remover los sedimentos adheridos a ellas (Figura A-4)
- f) Secar con un trapo o jerga

Una vez terminada la limpieza, los pasos a seguir para rearmar el sistema de bombeo de efluente son:

- g) Aflojar el tornillo de purga ubicado en la parte superior de la bomba
- h) Llenar de agua el tubo de succión
- i) Cerrar el tornillo de purga
- j) Subir el switch de toma de corriente
- k) Bajar el tubo flexible de control de nivel a la marca que indica el nivel requerido

Como la bomba se encuentra dentro de la cisterna, está expuesta a condiciones de mucha humedad, por lo que es posible que pueda presentar óxido, en consecuencia es recomendable:

- a) Periódicamente aplicar grasa al rotor
- b) Revisar sello mecánico y baleros
- c) En caso de avería, deberá ser llevada a un especialista

También es importante revisar la caja de toma de corriente (ver zona de suministro de energía eléctrica), lavar todo el material y herramientas utilizadas y enjuagarse las manos con una solución de hipoclorito de sodio.



Figura A-5. Cisterna de almacenamiento vacía para proceder al mantenimiento.