

46



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

Facultad de Química

**“BASES DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE
UN REACTOR BIOLÓGICO EXPERIMENTAL
BASADO EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES
ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL”**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

FRANCISCO ENRICO FENOGLIO LIMÓN

México

2000

284987



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: Prof. Rodolfo Torres Barrera
Vocal: Prof. Humberto Rangel Dávalos
Secretario: Prof. Victor Manuel Luna Pabello
Primer suplente: Prof. Hilda Elizabeth Calderón Villagómez
Segundo suplente: Prof. Alfonso Durán Moreno

Sitio donde se desarrolló el tema:

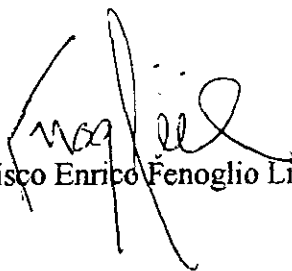
Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental
Conjunto "E" Laboratorios 301-303
Facultad de Química U.N.A.M. y en:
Talleres de Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural
Ciudad Universitaria U.N.A.M.

Asesor del tema:



Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

Sustentante:



Francisco Enrico Fenoglio Limón

“Lo divisó bajo un pino, sentado en el suelo, disponiendo las pequeñas piñas caídas a tierra según un dibujo regular, un triángulo isósceles. A esas horas de la madrugada, Agilulfo sentía siempre la necesidad de aplicarse a un ejercicio de exactitud: contar objetos, ordenarlos en figuras geométricas resolver problemas de aritmética. Es la hora en que las cosas pierden la consistencia de sombra que las ha acompañado durante la noche y vuelven a adquirir poco a poco los colores, pero mientras tanto atraviesan una especie de limbo incierto, apenas rozadas y casi aureoladas por la luz; la hora en que se está menos seguro de la existencia del mundo. Y Agilulfo tenía siempre la necesidad de sentir frente a sí las cosas como un muro macizo al que contraponer la tensión de su voluntad, y sólo así lograba mantener una segura conciencia de sí. Pero si el mundo, en cambio, se difuminaba en lo incierto, en lo ambiguo, también él se sentía anegar en esta mórbida penumbra, no lograba ya que aflorase del vacío un pensamiento claro, un arrebató de decisión, un pundonor. Se encontraba mal: en esos momentos se sentía desvanecer; a veces sólo a costa de un esfuerzo supremo conseguía no disolverse. Y entonces se ponía a contar: hojas, piedras, lanzas, piñas, lo que tuviera delante. O a ponerlas en fila, a ordenarlas en cuadrados o en pirámides. El aplicarse a estas exactas ocupaciones le permitía vencer el malestar, absorber el descontento, la inquietud y el marasmo, y recobrar la lucidez y compostura habituales.”

Italo Calvino,
El Caballero Inexistente

“- Si, soy blanco ahora –dijo Gandalf-. En verdad soy Saruman, podría decirse. Saruman como él tendría que haber sido. Pero ¡contadme de vosotros! He pasado por el fuego y por el agua profunda desde que nos vimos la última vez. He olvidado buena parte de lo que creía saber y he aprendido muchas cosas que había olvidado. Ahora veo cosas muy lejanas, pero muchas otras que están al alcance de la mano no puedo verlas.”

J. R. R. Tolkien
El Señor de los Anillos, Las Dos Torres

Para Libia, α y Ω
(Apoc. 1:08)

RECONOCIMIENTOS

Al Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQAYQA) de la Facultad de Química de la UNAM, por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo.

A la Dirección General de Obras y Servicios Generales de la UNAM y en particular al personal de los Talleres de Conservación, Zona Cultural, por su apoyo y colaboración.

Al CONACyT, por el apoyo otorgado mediante la asignación de una beca en el marco del proyecto 3302P-B "Tratamiento de aguas residuales usando un sistema de raíces de humedales".

A la GTZ y particularmente al Dr. Bertram Nagel por el apoyo para la terminación de este trabajo mediante la asignación de una beca.

A los miembros del jurado por sus aportaciones y comentarios

Al Dr. Victor Manuel Luna Pabello, por su infinita paciencia y por hacer siempre todo lo que estuviera a su alcance

A la Dra. Carmen Durán de Bazúa, por la generosa actitud con la que comparte su conocimiento y por la minuciosa y detallada revisión que hizo de este trabajo

Al Arq. Xavier Fonseca, al Ing. Cesar Agumosa, al Ing. Leonardo Ponce, al Biólogo Javier Montoya y a Jacobo Malfavon, por su apoyo y colaboración

AGRADECIMIENTOS

A Jeepie y a Franco, porque, finalmente, sin ellos nada de esto hubiera sido posible

A Cusscus, Gianni y Fifo (en inequívoco orden de aparición), por ser quienes son y estar donde están

A Guido Fenoglio, el primer cómplice, porque no es lo mismo un tubo de 1 pulgada que dos de $\frac{1}{2}$ pulgada

A Alejandro Mier, porque (i, j, k) forman un campo generador

A Alicia Bonfil, porque $\tan x = \frac{\sin x}{\cos x}$

A Eduardo Pérez Cisneros, porque $\tau_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr}$

A Arturo Zentella, por $e^{[A]}$ y otros viajes

Al Ing. León Coronado, porque finalmente el sacerdote si viajó a Marte

Al Ing. Ramón Arnaud, porque $E=S+A$

Al Profersor Roldán, por saber darle buen uso al estuche de vectores

A Toño Contreras, por su legítimo interés en el contenido de este trabajo

A León, my seven days drinking partner... between some other hardcore thing

A Efraín, compañero de viaje por el árido mundo de lo abstracto

A Rodrigo, por su increíble capacidad de conciliar

A Agustín, por la gran dedicación que muestra, aún, en el trabajo de los demás

A Antje und Matthias, für die neue Bedeutung der Freundlichkeit

A la turba de locos que tengo por familia, Libia, nonno y nonna, Jeepie, Franco, Cusscus, Gianni, Maggie, Fifo, Agus, Jortz, Rodrigo, Licha, Alejandro, El Bazán, León, Efraín, Isela, Ilya, Ira, Bele, Leonardo y por supuesto Diego, el peor de todos

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos	6
2. ASPECTOS GENERALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	7
2.1 Aplicaciones de los humedales artificiales	7
2.2 Ventajas y desventajas en el uso de humedales artificiales	8
2.3 Clasificación de los humedales artificiales	10
2.3.1 Sistemas emergentes	10
2.4 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)	12
2.4.1 El papel de los microorganismos	13
2.4.2 La función del lecho o medio de soporte	13
2.4.3 La importancia de las plantas vasculares	13
2.4.4 La alimentación del agua residual	14
3. ESTUDIO DE UTILIDAD	16
3.1 Evaluación de diferentes materiales de empaque para ser usados en la construcción de un HAFV	17
3.1.1 Metodología y lista de materiales	17
3.1.2 Procedimiento experimental	21
3.1.3 Resultados	23
3.1.4 Discusión y conclusiones	29
3.2 Evaluación costo beneficio	34
3.2.1 Utilidad del sistema	36
4. INFORMACIÓN TÉCNICA PREVIA	38
4.1 Justificación del proyecto	38
4.2 Selección y caracterización del terreno	39
4.3 Selección del tren de tratamiento	42
4.4 Planeación	44
4.4.1 Ruta crítica para la construcción del HAFV	44
4.4.2 Lista de actividades	46
5. CRITERIOS FUNDAMENTALES DE DISEÑO	51
5.1 Tipo de proceso	52
5.2 Capacidad	52
5.3 Alimentación	53
5.4 Efluente	55

5.5 Normatividad	55
5.6 Requerimientos de servicios auxiliares	55
5.6.1 Energía eléctrica	55
5.6.2 Alimentación de agua potable	56
5.7 Localización de la planta	56
5.8 Condiciones climatológicas	57
5.8.1 Temperatura	58
5.8.2 Precipitación pluvial	58
5.8.5 Humedad relativa y presión atmosférica	59
5.9 Descripción general del equipo	60
5.9.1 Fosa séptica	60
5.9.2 Tanque homogeneizador, sedimentador	61
5.9.3 Bomba	62
5.9.4 Humedal artificial de flujo vertical	62
5.8.5 Tanque colector	63
5.10 Lista de materiales y equipo	64
5.11 Hojas de datos	65
5.12 Diagrama de flujo de proceso	68
6. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL EQUIPO Y SU INSTALACIÓN	71
6.1 Fosa séptica	71
6.2 Tanque homogeneizador, sedimentador	73
6.3 Sistema de bombeo	74
6.4 Humedal artificial de flujo vertical	78
6.4.1 Excavación	78
6.4.2 Impermeabilización	79
6.4.3 Drenado, zona de rebose y salida	84
6.4.4 Empacado	85
6.4.5 Siembra de plantas	85
6.4.6 Tendido de tuberías de alimentación	88
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXO	98
A-1 Memoria de cálculo	98
Balance global de agua	
Balance de agua en el tanque sedimentador	
Balance de agua en el HAFV	
A-2 Diseño	101
A-3 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno	103

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1. Secuencia de actividades para los experimentos en columnas empacadas
- Figura 3.2. Instalación de las columnas y conexión del equipo
- Figura 3.3. Detalle de la construcción de las columnas
- Figura 4.1. Aspecto actual de la tubería de descarga proveniente de regaderas
- Figura 4.2. Aspecto actual de la fosa séptica que recibe la descarga proveniente de excusados
- Figura 4.3. Ubicación en el mapa de la zona asignada para la construcción del HAFV
- Figura 4.5 Ruta crítica para la construcción del tren de tratamiento
- Figura 5.1. Vista aérea del lugar donde se ubicará el HAFV
- Figura 5.2 Esquema simplificado de la fosa séptica
- Figura 5.3 Esquema simplificado del tanque homogeneizador-sedimentador
- Figura 5.4 Esquema simplificado del HAFV
- Figura 5.5. Esquema simplificado del tanque colector
- Figura 5.6. Hoja de datos para el medidor de flujo, tomado de los datos proporcionados por el proveedor
- Figura 5.7. Hoja de datos para la bomba, tomada de los datos proporcionados por el proveedor
- Figura 5.8. Hoja de datos para la “Geomembrana” de PPE, tomada de los datos proporcionados por el proveedor
- Figura 6.1. Vista lateral de la fosa séptica construida en la zona
- Figura 6.2 Excavación realizada para la construcción del HAFV
- Figura 6.4. Vista de las paredes de cemento aplanadas del HAFV
- Figura 6.5. Colocación de las tuberías de drenado en el fondo del HAFV
- Figura 6.6. Conexión de la tubería de drenado al fondo del HAFV
- Figura A.1 Ejemplos de curvas de la DBO
- Figura A.2 Accesorios del medidor manométrico

LISTA DE TABLAS

- Tabla 3.1. Distribución del material de empaque dentro de las columnas
- Tabla 3.2. Tamaño de partícula y volumen de material utilizado en las columnas
- Tabla 3.3. Porcentaje de porosidad de los diferentes materiales de empaque
- Tabla 3.4. Tiempo de residencia hidráulica para cada una de las columnas.
- Tabla 3.5. Tiempo de *residencia hidráulica para cada una de las columnas (Promediado)*.
- Tabla 3.6. Sólidos totales en la salida de las columnas
- Tabla 3.7. Sólidos totales promediados en la salida de las columnas
- Tabla 3.8. Materia orgánica a la salida de las columnas medida como DBO_5
- Tabla 3.9. Materia orgánica a la salida de las columnas medida como DBO_5 valores promediados
- Tabla 3.10. Porcentaje de remoción de materia orgánica a la salida de las columnas medida como DBO_5
- Tabla 3.11. Materia orgánica a la salida de las columnas medida como DQO
- Tabla 3.12. Porcentaje de remoción de materia orgánica a la salida de las columnas medida como DQO
- Tabla 3.13. Porcentaje de remoción de materia orgánica a la salida de las columnas medida como DQO, valores promediados
- Tabla 3.14. Lista de precios para materiales y equipo
- Tabla 4.1. Lista de actividades que expresa la duración en días de cada una
- Tabla 5.1. Capacidad de trabajo del HAFV
- Tabla 5.2. Muebles de baño en uso en las instalaciones
- Tabla 5.3. Valores fisicoquímicos ponderados para el agua residual doméstica
- Tabla 5.4. Valores fisicoquímicos estimados para el efluente
- Tabla 5.5. Requerimientos para la acometida eléctrica
- Tabla 5.6. Temperaturas registradas durante el año de 1997
- Tabla 5.7. Valores de precipitación pluvial registrados mensualmente durante el año de 1997
- Tabla 5.8. Valores de la humedad relativa registrados durante el año de 1997
- Tabla 5.9. Lista de materiales y equipo
- Tabla 5.10. Balance de materia por cada corriente de proceso
- Tabla D.1. Determinación de la carga orgánica en función del área superficial

Tabla A.1. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-ECOL-003-1997).

Tabla A.2. Determinación del volumen de la muestra y escala requerida

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1. Tiempo de residencia hidráulica para grava y escoria volcánica

Gráfica 3.2. Sólidos totales en las cuatro columnas medidos a la salida de las mismas

Gráfica 3.3. Comparación de la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DBO_5 para ambos materiales de empaque

Gráfica 3.4. Comparación de la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DQO para ambos materiales de empaque

Gráfica 4.4. Programa de avance para de las actividades previas a la construcción del HAFV

Gráfica 4.5. Programa de avance para las actividades de construcción del HAFV

Gráfica 4.6. Diagrama de la programación de avance de las actividades previas a la construcción del HAFV

Gráfica 4.7. Diagrama de la programación de avance para las actividades de construcción del HAFV

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y NOMENCLATURA

A	Área superficial de las columnas, m ²
d	Diámetro de las columnas
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, mg/L
DQO	Demanda química de oxígeno, mg/L
DGOySG	Dirección General de Obras y Servicios Generales (UNAM)
dV/dt :	Volumen de acumulación en el sistema (m ³ /año)
Et:	Volumen de evapotranspiración anual (m ³ /año)
EV.	Escoria volcánica
fve :	Flujo volumétrico anual de entrada al HAFV (m ³ /año)
fvs:	Flujo volumétrico anual de salida del HAFV (m ³ /año)
HA	Humedal(es) artificial(es)
HAFH	Humedal artificial de flujo horizontal
HAFV	Humedal artificial de flujo vertical
H-H	Horas-Hombre
I:	Flujo de infiltración anual (m ³ /año)
N _{TOT}	Nitrógeno total
NH ₄ -N	Nitrógeno amoniacal
NO ₃	Nitratos
NOM	Norma Oficial Mexicana
P _{TOT}	Fósforo total
P.e.	“Population Equivalent”, definido como 65g DBO ₅ /persona día.
PEE	Polietileno
pH	Potencial de Hidrógeno
PIQAYQA	Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental
Pp:	Volumen de precipitación pluvial anual (m ³ /año)
Sse	Sólidos sedimentables
STT	Sólidos totales

RESUMEN

Actualmente en México se hace necesario el desarrollar técnicas enfocadas a resolver la cada vez más grande problemática de escasez de agua. Aunque el desarrollo tecnológico permite disponer abundantemente de agua de buena calidad, el crecimiento poblacional genera el rápido agotamiento de este recurso, como se hace evidente día a día. Este problema, aunado al inadecuado control de las descargas de agua contaminada en los diferentes cuerpos naturales receptores, ha hecho que se preste mayor atención a la solución de este problema por parte de las autoridades responsables de darle solución.

Por este motivo, es necesaria la búsqueda de alternativas que permitan solucionar este problema, y que sean accesibles a todo tipo de comunidad en el mundo, logrando así que la disponibilidad del agua se realice de manera equitativa y se mantenga en un adecuado equilibrio.

Los "Humedales Artificiales" (HA) son sistemas depuradores de agua residual, que se presentan como una alternativa viable para la solución de este problema puesto que son sistemas de bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, tienen un periodo de vida útil relativamente largo y no sufren fácilmente desequilibrios bruscos por cambios en las condiciones de operación. Éstos son sistemas de tratamiento biológico para aguas residuales que son utilizados principalmente para la depuración de aguas que contienen contaminantes de tipo doméstico, aunque pueden ser usados también para la depuración de aguas contaminadas con detergentes, metales pesados e incluso hidrocarburos. El funcionamiento de los HA se basa en tres constituyentes principales: los microorganismos tróficamente activos dentro del sistema, las plantas vasculares que acondicionan un hábitat propicio para la proliferación de los microorganismos y el lecho o material de empaque en el que crecen tanto los microorganismos como las plantas vasculares, además de servir como material filtrante para algunos sólidos presentes en el agua residual a tratar. A través de la interacción de estos tres factores es como se logra la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual. Los HA han sido estudiados ampliamente en Europa y Norteamérica y se han desarrollado técnicamente con una gran aceptación pero en México han sido poco estudiados, y, por tal motivo, su desarrollo es prácticamente inexistente, principalmente los catalogados como HA de flujo vertical.

El presente trabajo tiene la finalidad de sentar las bases para la construcción de un humedal artificial de flujo vertical experimental que permita estudiar su comportamiento y evaluar los factores que repercutan en la optimización de la eficiencia operativa de estos sistemas en México y otros países con características similares, de tal modo que puedan ser adaptados a condiciones particulares.

Este sistema está diseñado para ser construido dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Ciudad Universitaria, en el área donde se localizan los talleres de conservación, de tal manera que, además de servir para su estudio, el sistema suministrará un volumen de entre 400 y 600 litros diarios de agua con calidad para riego de las áreas verdes aledañas al sitio o para humedecer las pilas de composta. El área efectiva del sistema será de 15 m² y será capaz de estabilizar 910 g DBO₅ soluble por día con una densidad de 3 plantas sembradas por metro cuadrado. Se espera que el sistema una vez arrancado se estabilice en 7 meses lográndose una depuración entre 85 y 95% de eficiencia en la DBO₅. El costo estimado total del sistema es de \$18,989.50 incluyendo materiales, accesorios y obra civil. El tiempo estimado para la construcción de éste sistema es de seis semanas y el tiempo de vida útil reportado es de al rededor de 25 años.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un compuesto vital para la vida y ocupa cerca del 70% de la superficie total de la Tierra. Para el ser humano en particular, la disponibilidad de agua es un factor que determina su buen desarrollo. Como puede verse a lo largo de la historia, civilizaciones completas han desaparecido o han florecido en función de su disponibilidad de agua. Hoy en día, aunque el desarrollo industrial y tecnológico permite disponer abundantemente de agua de buena calidad, el crecimiento poblacional agota este recurso y lo encarece en todos los niveles de la vida salvaje y doméstica en el planeta (SEDUE, 1987). Este problema, aunado al inadecuado control que existe en las descargas de agua contaminada hacia los diferentes cuerpos naturales receptores de la misma, ha hecho que la atención que se presta a la solución de estos problemas se enfrente de manera más seria por parte de las autoridades responsables de darle solución. El agua, una vez utilizada, si se dispone de manera incorrecta de ella, contribuye con la transmisión de enfermedades tales como cólera y tifoidea ocasionando el detrimento de la calidad de vida de la población que se encuentra en contacto con ella, principalmente en los países menos desarrollados (SEDUE, 1987) entre los que se encuentra México. Por estos motivos, es necesaria la búsqueda de mecanismos que permitan solucionar este problema, y que sean accesibles a todo tipo de comunidades en el mundo para lograr así que la disponibilidad del agua se realice de manera equitativa y se mantenga en un adecuado equilibrio.

Los humedales artificiales (HA) son sistemas depuradores de aguas residuales y son, sin lugar a dudas, una alternativa viable para el tratamiento de agua residual puesto que son de bajo costo de construcción, operación y mantenimiento. Tienen un periodo de vida útil largo (25 años) y no sufren fácilmente desequilibrios por cambios en la concentración de contaminantes y de flujo de agua (Ramírez-Carrillo y col. 1997; Luna-Pabello y col. 1997a; Luna-Pabello y col. 1997b; Luna-Pabello y col. 1997c; Durán 1994; Kadlec, 1996). Estas características abren una perspectiva para el estudio, desarrollo, mejoramiento y aplicación de estos sistemas en México y otros países.

Los HA son sistemas de tratamiento biológico para aguas residuales y se utilizan principalmente para la depuración de aguas que contienen contaminantes de tipo doméstico, aunque también pueden ser utilizados para la depuración de aguas contaminadas con detergentes, metales pesados e incluso hidrocarburos. El funcionamiento de estos sistemas se basa en tres constituyentes principales: 1) La gran diversidad de microorganismos que se reproducen dentro del sistema los cuales biodegradan gran parte de los contaminantes orgánicos presentes, 2) las plantas vasculares que acondicionan un hábitat propicio para la proliferación de los microorganismos y toman compuestos nitrogenados y fosforados presentes en el agua y 3) el lecho, que funciona como medio de soporte tanto para los microorganismos como para las plantas vasculares. Además sirve como filtro para los sólidos presentes en el agua residual por tratar. A través de la interacción de estos tres factores se logra depuración del agua contaminada.

Estos sistemas han sido estudiados ampliamente en Europa y Norteamérica y se han desarrollado técnicamente con una gran aceptación, aún cuando presentan relativas desventajas, como es la gran extensión de terreno requerida para su construcción. En México, los HA han sido poco estudiados y, por tal motivo, su desarrollo es prácticamente inexistente. En este sentido es necesario desarrollar técnicas alternativas enfocadas a resolver los problemas de escasez de agua, útil para las diferentes actividades humanas, así como para la recuperación de agua contaminada. Dichos sistemas deben ser económicamente viables y no requieran mano de obra calificada para la construcción y operación de los mismos. Además deben permitir el cumplimiento de las normas nacionales vigentes en materia de calidad de agua tratada.

El presente trabajo tiene como finalidad sentar las bases para la construcción de un humedal artificial de flujo vertical (HAFV) experimental que permita estudiar su comportamiento y evaluar los factores que nos permitan poner en práctica de manera eficiente el uso de estos sistemas en nuestro México, de tal modo que puedan ser operados en condiciones particulares.

Este sistema fue diseñado para ser construido dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Ciudad Universitaria, en los talleres del Departamento de Conservación que forman parte de las oficinas de la Dirección General de Obras y Servicios Generales de la misma universidad, de tal manera que, además de servir para su estudio, el

sistema suministrará un volumen de entre 400 y 600 litros diarios de agua tratada para ser utilizada en el riego de las áreas verdes aledañas al sitio o para humedecer las pilas de composta que utilizan los desechos de jardinería.

El documento que ahora se presenta tiene la finalidad de presentar los fundamentos necesarios para la construcción de un HAFV a nivel piloto que permita, como ya se dijo, evaluar experimentalmente a través de su operación la posibilidad de utilizar este tipo de equipos en diversas zonas de la República Mexicana y así verificar su funcionalidad y capacidad de adaptación evaluando su eficiencia operativa.

La información contenida en esta tesis incluye una breve descripción de los aspectos teóricos generales de los que son los humedales artificiales y de la importancia de sus principales características.

Seguidamente (Capítulo 3) se expone una evaluación de la utilidad que presentaría contar con este sistema para su operación y estudio, comparando ésta con los costos aproximados que representaría la construcción y puesta en marcha del sistema de tratamiento. Como parte de este estudio se incluye el desarrollo experimental previo enfocado a la evaluación de algunas características importantes para fijar criterios de diseño y construcción.

Los capítulos 4, 5 y 6 contienen el desarrollo del proyecto de diseño en sí, iniciando con los antecedentes y la justificación de este trabajo, describiendo de manera general los acuerdos de cooperación entre las autoridades involucradas con el diseño y construcción del mismo, los primeros criterios de selección del tren de tratamiento y, principalmente, las diferentes actividades por desarrollar tanto para la conceptualización y diseño del sistema de tratamiento como la secuencia sugerida para la construcción.

De manera particular en el capítulo 5, incluye los aspectos de la ingeniería básica. En el se exponen los criterios fundamentales de diseño, las variables que determinan dichos criterios y se hace una primera aproximación a los aspectos generales con los que debe de contar cada uno de los equipos involucrados con el tren de tratamiento y que deben ser incluidos en su diseño. En

esta sección se encuentra el diagrama de flujo de proceso y se muestra la lista de materiales, equipo e instrumentos requeridos.

Finalmente en el capítulo 6, se hace una descripción detallada de las características particulares de cada uno de los principales componentes del tren de tratamiento, definiéndose algunos parámetros importantes como son las especificaciones de materiales, los procedimientos específicos de construcción. La información vertida se apoya en la presentación de fotografías y diagramas detallados que permiten explicar de manera más clara la conceptualización del sistema. La información bibliográfica consultada más relevante, queda señalada en su respectivo apartado organizada de manera alfabética.

Como capítulo final se encuentran las conclusiones, donde se presenta un balance de los resultados de este trabajo, comparándolos con los objetivos que se plantearon al principio del mismo. Y se describen también algunos de los contratiempos enfrentados y las vías que se siguieron para resolverlos.

1.1 Objetivos

Diseñar un tren de tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel piloto basado en el principio de funcionamiento de los un humedales artificiales de flujo vertical, que permita obtener datos experimentales útiles para el entendimiento operativo de estos sistemas

Realizar pruebas experimentales en columnas empacadas que permitan seleccionar el tipo de material de soporte más adecuado para ser utilizado en la construcción del HAFV experimental.

El diseño de este tren de tratamiento debe también contemplar, además de sus fines experimentales, la posibilidad de depurar efluentes de agua residual doméstica para proveer de agua con calidad para riego de las áreas verdes cercanas a la zona asignada para su construcción.

Iniciar los trabajos de construcción y establecer el camino para la terminación de los mismos.

2. ASPECTOS GENERALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales (HA) son, como lo indica su nombre, sistemas construidos por el hombre con el fin de depurar aguas residuales, que imitan los procesos de depuración de los humedales naturales pero controlando las variables físicas, químicas y biológicas que determinan la eficiencia en la remoción de agentes contaminantes del agua (Bahlo y Wach, 1995; Wilderer, 1983).

Estos sistemas aprovechan las características de depuración natural de los microorganismos. De este modo, las características fundamentales de depuración biológica de los HA son similares a los de las lagunas de degradación facultativas (Metcalf, 1991), pero combinan además las ventajas de tener un material de empaque, que sirve como soporte a los microorganismos además de servir como material filtrante de sólidos suspendidos y como superficie de adsorción de metales pesados (Netter, 1990). Otra característica adicional de los HA es que, al utilizar plantas sembradas sobre el lecho de soporte, generan condiciones tales que favorecen el desarrollo de microorganismos en la zona de la rizosfera, ayudan a la oxigenación de esta zona y contribuyen de manera significativa a la depuración del agua, pues toman de ésta los nutrimentos presentes, tales como fósforo y nitrógeno (Haberl, 1997).

2.1 Aplicaciones de los humedales artificiales

En términos generales, la aplicación más común de los HA se encuentra en la depuración de aguas residuales domésticas, aunque no se descarta la posibilidad de que puedan ser utilizados en otros campos del tratamiento de aguas o la de ser alimentados con aguas que no tengan las características generales de las aguas domésticas (Conley, 1991; Gesberg, 1985). Independientemente de esto, los HA pueden tratar aguas de origen doméstico y su principal aplicación se encuentra en el tratamiento de aguas que provengan de regiones rurales o de comunidades pequeñas y medianas que no excedan los 20 mil habitantes (Luna-Pabello y col., 1997a). La finalidad de proveer a estas comunidades con agua tratada de bajo costo, especialmente a comunidades que no cuentan con obras de suministro de agua para riego debido

a la dificultad de acceso por las características geográficas o que no cuentan con los suficientes recursos para desarrollar tecnologías más costosas es una de las ventajas de esta tecnología.

Por otro lado, no se recomienda utilizar este tipo de sistemas para satisfacer las necesidades de tratamiento de agua en las grandes urbes o en los megaproyectos de tratamiento de grandes volúmenes de aguas, a menos que se trate de manera individual o modular, esto es, que se construyan de manera independiente para tratar los efluentes por ejemplo de pequeñas zonas residenciales, unidades habitacionales, clubes deportivos, hoteles y restaurantes. También pueden ser utilizados en el caso de grandes volúmenes por tratar como tratamiento terciario o final para lograr alguna característica particular en los efluentes tratados como podría ser, la remoción de nutrimentos como nitrógeno y fósforo.

2.2 Ventajas y desventajas en el uso de humedales artificiales

La principal ventaja de los HA es que los costos de construcción, operación y mantenimiento son mucho menores comparados con los sistemas convencionales de tratamiento (Luna-Pabello, 1997a; Ramírez-Carrillo y col., 1997). Pese a lo anterior, estos sistemas son capaces de depurar eficientemente las aguas domésticas, siempre y cuando sean operados adecuadamente hasta lograr efluentes que cumplan con las normas nacionales e internacionales en la descarga, para ser empleadas para riego agrícola, para uso secundario o para ser devuelta a los reservorios naturales con el fin de enriquecerlos. En términos generales, los estándares de descarga son alrededor del 85% de eficiencia en la remoción de DBO_5 , más del 90% en coliformes fecales. Operados bajo condiciones particulares se tienen buenos resultados en la remoción de nutrimentos tales como nitrógeno y fósforo.

Estos sistemas han sido estudiados en condiciones extremas (Cooper y col., 1996) y en estos estudios se ha revelado que pueden soportar cambios significativos en la carga de contaminantes de influente sin sufrir desequilibrios serios, tales como los que ocurrirían en, por ejemplo, los digestores anaerobios. También pueden depurar aguas que contengan concentraciones medias de detergentes, sustancias tóxicas, metales pesados y algunos microorganismos patógenos (Netter,

1990; Rivera y col., 1993). Actualmente se realizan estudios para determinar si los HA son capaces de depurar aguas que contengan compuestos orgánicos derivados del petróleo y los resultados preliminares demuestran que sí es posible, siempre y cuando las concentraciones no sean altas y se tome un tiempo adicional para la estabilización del sistema con el fin de que los microorganismos se acostumbren al medio agresivo (Ramírez-Carrillo y col., 1997).

Como ya se mencionó anteriormente, el uso de los HA está enfocado a comunidades rurales y semiurbanas, pero no se descarta la posibilidad de construir estos sistemas para la depuración de aguas producidas en zonas urbanas. Pueden ser construidos en áreas verdes, jardines camellones de avenidas y parques públicos (Luna-Pabello y col., 1997 a, b, c) pues, debido a las características de la vegetación utilizada en su construcción, tienen la apariencia de cercos naturales lo cual, a diferencia de otros sistemas, resulta agradable a la vista. Además, si son operados de manera correcta y se les da el mantenimiento que requieren, no generan malos olores ni favorecen la presencia de mosquitos (Sereico y Larneo, 1988).

Finalmente, como los HA son sistemas de tratamiento que simulan las características de zonas naturales, sirven como hábitat de desarrollo para la vida de algunas especies silvestres como reptiles y anfibios, pero también como zona para aves migratorias. Contrariamente a lo anterior, la principal desventaja de los HA es que requieren extensiones considerables de terreno para su construcción, puesto que el área efectiva para lograr la adecuada depuración de las aguas es muy grande. En países como el nuestro, en los que se cuenta con grandes extensiones de terreno disponible, es menos crítico cuando el costo por metro cuadrado de terreno no es muy alto, como es el caso de los terrenos agrícolas; pero en zonas donde el uso del suelo es de carácter habitacional o comercial podría considerarse un desperdicio no disponer del terreno para fines más lucrativos, pero no debe olvidarse que la utilización de un sistema de tratamiento de agua relativamente económico permite obtener agua de buena calidad a muy bajo costo. Además, debe considerarse que las normas de descarga de agua residual tanto nacionales como internacionales se hacen cada día más estrictas y por tal razón será inevitable disponer de estas áreas tarde o temprano.

2.3 Clasificación de los humedales artificiales

A lo largo de más de tres décadas, los HA se han ido modificando para lograr que las características de los cuatro componentes principales (el medio de soporte o de empaque, los microorganismos presentes en éstos, las plantas y el tipo de alimentación) interactúen para lograr los mejores resultados en términos de eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en el agua. De estas modificaciones se pueden destacar tres grupos principales de sistemas que se clasifican de acuerdo con la forma de vida de las plantas dominantes en el humedal (Brix, 1994). Esta clasificación es la que actualmente utilizan la mayor parte de los autores dedicados al estudio de esta área y que consiste en:

- Sistemas de libre flotación
- Sistemas subemergentes
- Sistemas emergentes

Una descripción de las características generales de estos tres tipos de HA puede encontrarse recogida en documentos anteriores (Ramírez, 1998). En este mismo documento puede encontrarse también una síntesis del desarrollo histórico en el estudio y construcción de los HA en el mundo hasta 1997.

2.3.1 Sistemas emergentes

En este documento resulta de interés describir más detalladamente los humedales que utilizan plantas emergentes dado que es el tipo de humedal seleccionado para diseñar en este trabajo.

En éstos, las plantas no se encuentran flotando libremente, sino que se encuentran adheridas al material de soporte y, a diferencia de las plantas de los sistemas subemergentes estas sobresalen del nivel del agua. Existen dos variantes de humedales en este grupo: los humedales de flujo libre superficial y los de flujo subsuperficial o subterráneo. En los primeros el nivel del agua se mantiene siempre por arriba del nivel del material poroso de soporte; la rizosfera, las raíces y parte de los tallos de las especies vegetales se encuentra en contacto directo y constante con el

agua residual, lo que favorece la presencia de una gran cantidad de microorganismos aerobios por tener mayor oxigenación, y por este motivo, una más rápida degradación de los compuestos orgánicos (Sereico y Lameo, 1988). Estos sistemas tienen varias desventajas: Aunque tienen una alta oxigenación en la superficie, en las partes más profundas el sistema tiende a ser anaerobio y, por la metanogénesis en esta zona y el hecho de que la superficie del agua se encuentre siempre en contacto con la atmósfera, genera una gran cantidad de malos olores, además de favorecer la proliferación de mosquitos en algunas temporadas del año.

Por otra parte, se encuentran los humedales de flujo subterráneo o subsuperficial, en los que el agua alimentada fluye a través del lecho o material de empaque donde los contaminantes presentes en el agua se ponen en contacto directo con los microorganismos que se encuentran adheridos al material de soporte o que habitan en la zona de la rizosfera. En este arreglo, también se encuentran dos zonas: Una en la que la actividad metabólica de los microorganismos es aerobia, cerca de la superficie, en la zona llamada rizosfera y otra en la que la actividad metabólica anaerobia se encuentra hacia el fondo del humedal (Brix, 1996). La correcta interacción de estas dos actividades microbianas logra una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes, particularmente los compuestos nitrogenados disueltos en el agua residual.

Los humedales de flujo subterráneo se encuentran clasificados en dos grupos, de acuerdo con la forma en la que se alimenta el influente y con la forma en la que fluye el agua a través de éstos:

- Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)
- Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

Básicamente en los HAFH, tal como su nombre lo indica, el agua residual fluye de manera longitudinal a través de la sección transversal. Aunque existen diferentes formas de alimentación, normalmente se hace por medio de un tubo horizontal perforado o una canaleta (Ramírez, 1998), montado en un costado del sistema. Éste facilita que el influente se introduzca y se percole por gravedad en el seno del lecho empacado, ayudado por una ligera inclinación de la entrada a la salida que se encuentra en el costado opuesto del humedal. De igual forma que como sucede en los HAFV, la conducción del agua a lo largo del sistema, como se explicará con detalle más adelante, depende de diversos factores como son las raíces de las plantas vasculares, la porosidad

del medio filtrante, las características físicas del material, que dan lugar a la capacidad de conducción hidráulica adecuada para tener el tiempo de residencia necesario del agua en el sistema.

Por otro lado se encuentran los HAFV, siendo estos de mayor importancia en este documento, se describen con profundidad a continuación puesto que el sistema que se diseñó y cuyas características se describen en este documento es precisamente un humedal artificial de flujo vertical.

2.4 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

Este tipo de humedales son los que tienen el desarrollo más reciente en el estudio de los humedales como sistemas depuradores de agua. El interés en estos sistemas se debe a la necesidad de ajustar las características de los efluentes tratados a los requerimientos, cada día más estrictos en los países de primer mundo, particularmente en lo relativo a la remoción de nitrógeno total presente en los efluentes domésticos. Una característica distintiva que presentan los HA en general es el hecho de que el metabolismo predominante es de tipo anaerobio dado que la propia estructura de estos sistemas limita la capacidad de introducir oxígeno disuelto en el agua alimentada. De este modo, no se logra una adecuada transformación del nitrógeno amoniacal en nitratos y nitritos. Aunque ésta es la principal justificación del desarrollo de los HAFV en Europa, no es la única. Un metabolismo aerobio degrada la materia orgánica común varias veces mas rápidamente que un metabolismo anaerobio (Metcalf, 1991). De este modo, aunque los HAFV tienen características en el diseño que dificultan su construcción y operación, en comparación con los HAFH tienen también mayor eficiencia en remoción de materia orgánica medida como DBO₅; además, los de flujo vertical soportan mayores cargas orgánicas en el influente y son menos propensos a la desestabilización por modificaciones en la carga orgánica a la entrada. En términos generales, el proceso de purificación de los HAFV, como se mencionó anteriormente, consiste en la correcta combinación de las cuatro características básicas de estos sistemas, las cuales se describen a continuación:

2.4.1 El papel de los microorganismos

Los microorganismos son la base para el funcionamiento de los humedales, pues de ellos depende la remoción de materia orgánica presente en el agua. Los compuestos que generalmente pueden ser biotransformados por los microorganismos son compuestos nitrogenados, fosforados y, evidentemente, compuestos de carbono. Algunos de estos microorganismos funcionan como predadores de otros microorganismos no deseados, así que su actividad depurativa no se limita a la eliminación de compuestos orgánicos únicamente, sino que también tienen la capacidad de desinfección del agua.

2.4.2 La función del lecho o medio de soporte

El lecho formado por material de empaque que sirve de soporte para los microorganismos, además de funcionar como medio filtrante que retiene los sólidos suspendidos presentes en el agua (depositados sobre la superficie de las partículas de dicho material para ser degradados posteriormente por los microorganismos), si es elegido correctamente, tiene la capacidad de adsorber sobre su superficie materia orgánica disuelta y algunos metales pesados, así como compuestos orgánicos tóxicos. Evidentemente, esta capacidad del material disminuye con el tiempo, no obstante la vida útil promedio de estos sistemas está calculada en aproximadamente 25 años.

Una característica muy importante del lecho es el diámetro de las partículas utilizadas en el empaque y la forma en que éstas son colocadas en diferentes perfiles a largo de diferentes etapas del HAFV. Esto es lo que determina las características hidráulicas del sistema y, por lo tanto, el tiempo de residencia del agua en el lecho, al igual que el tiempo que la materia orgánica permanezca en contacto con los microorganismos para ser degradada (Perfler, 1994).

2.4.3 La importancia de las plantas vasculares

Las plantas vasculares sembradas en el lecho del sistema durante el día, con la fotosíntesis, aportan oxígeno a través de los rizomas hacia la zona denominada rizosfera, aumentando la

capacidad de aireación del medio de soporte y con ello la degradación aerobia de los contaminantes (Bogdanowicz, 1996; Brix, 1993), además de fijar otros contaminantes del agua como es el caso del nitrógeno. Esto no sería posible si antes el nitrógeno amoniacal (NH_4) no fuera transformado en nitratos y nitritos (NO_3^- , NO_2^-) (Mander, 1996), y esto se logra por medio de la nitrificación en la zona aerobia del sistema que es favorecida por la presencia de las macrofitas.

Otra característica importante en la presencia de dichas plantas es que disminuyen el riesgo de taponamiento del lecho, debido a que favorecen la capacidad de infiltración de líquido en el medio de soporte, manteniendo así la conductividad hidráulica del mismo (Brix, 1996).

Varias investigaciones realizadas con diferentes tipos de plantas demuestran que hay algunas que cumplen mejor con las características deseadas para la construcción de humedales de flujo subterráneo (Armstrong y Armstrong, 1990; Brix, 1987; Green y Upton, 1995; Thomas y Glover, 1995; Wood, 1995). Estas plantas son:

Carrizos (*Phragmites australis*)

Tules (*Typha latifolia*)

Juncos (*Cyperus papyrus*)

Estas macrofitas vasculares resultan las más adecuadas debido a que, entre algunas de sus características, poseen una elevada capacidad reproductiva y de crecimiento tanto en tallos y hojas como en las raíces; son resistentes a cambios de concentración en los contaminantes y cuentan con una alta adaptabilidad a distintas condiciones climáticas. Además, sus tallos, ahuecados en el centro facilitan la oxigenación en la zona de la rizosfera del lecho.

2.4.4 La alimentación del agua residual

En los HAFV, uno de los parámetros más importantes es quizá la forma en la que se hace la alimentación del agua residual que tratará el sistema. Este tema será tocado con mayor

profundidad más adelante cuando se expongan algunas características de la construcción de este sistema. No obstante, es importante señalar que diversos estudios han revelado que la eficiencia en la remoción se ve directamente afectada por el número de intervalos de alimentación, el tiempo que se deja entre cada uno de ellos y el volumen que se alimenta, así como el tiempo que dura cada alimentación. Esto se ve limitado también por la cantidad de contaminantes que los microorganismos son capaces de degradar. Considerando como constante la cantidad de biomasa microbiana presente por metro cuadrado de superficie en el humedal (de hecho, algunos aplican un criterio de diseño además de las ecuaciones de simulación del proceso), se encuentra una estimación empírica utilizada por varios autores con respecto al influente que se debe alimentar en términos de la DBO_5 presente en el agua residual o por el promedio de materia orgánica producida por habitante (P.e.) por metro cuadrado superficial del sistema.

3. ESTUDIO DE UTILIDAD

En este capítulo se plantea un análisis de los beneficios que se obtendrían a corto y largo plazo tras la construcción del sistema al cual se refiere este documento, comparándolos con el costo aproximado que implicaría su construcción.

Para lograr esto deben evaluarse las alternativas de construcción para seleccionar la que resulte más adecuada a fin de cumplir con los objetivos para los cuales se proyecta el sistema o tren de tratamiento. Por tal motivo deben considerarse parámetros tales como: Las características fisicoquímicas del agua residual que se va a tratar así como con las que debe tener el agua una vez tratada; las características generales del sitio asignado para la construcción y montaje de los sistemas; las posibilidades de utilización para el agua tratada y los recursos técnicos, económicos y humanos con los que se cuenta a corto y largo plazos para la construcción y operación del equipo así como para el monitoreo y seguimiento detallado del comportamiento de los equipos. Es importante destacar que el objetivo principal que se persigue con la construcción de este humedal es el que sea utilizado para obtener datos acerca de su comportamiento para aplicarlos como criterios para la construcción de humedales artificiales de tamaño real adaptados a las condiciones que determinan su comportamiento dominante en México. Lo anterior no excluye la necesidad de realizar pruebas de laboratorio complementarias para la obtención de datos básicos útiles para el diseño de este sistema.

En los laboratorios del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQAYQA) de la Facultad de Química de la UNAM, lugar donde se realizó este proyecto, se ha seguido una trayectoria definida para evaluar diferentes materiales con el fin de utilizar aquél con el que se logre una remoción más eficiente de los contaminantes presentes en el agua residual reduciendo al máximo el área superficial del sistema (Ramírez, 1998). A lo largo de esta investigación, se han obtenido algunas características que son relevantes para este documento y que se mencionan, también, en este capítulo.

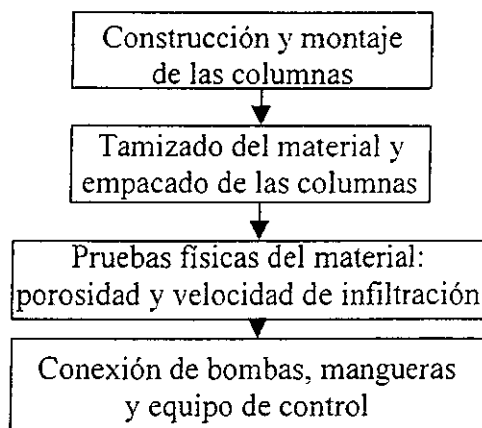
3.1 Evaluación de diferentes materiales de empaque para ser usados en la construcción de un HAFV

Como parte de esta evaluación para la construcción del HAFV se realizaron pruebas en columnas para determinar algunas características adicionales del material que se utilizaría para empacar este sistema, ya que en experimentos realizados anteriormente (Ramírez-Carrillo y col., 1997) se ha observado que la escoria volcánica (EV) cuenta con algunas características favorables en el funcionamiento de los HA en comparación con la grava, aún cuando es esta última la más recomendada en la bibliografía relacionada con la construcción de estos sistemas.

3.1.1 Metodología y lista de materiales

El objetivo que se persiguió en esta prueba experimental en particular, fue la de comparar el comportamiento de dos diferentes materiales de empaque, sometiéndolos a condiciones reales de operación en un intervalo de tiempo relativamente largo (Figura 3.1).

Para realizar esta prueba se utilizaron 4 columnas construidas con tubería de PVC (cloruro de polivinilo) de 15 cm de diámetro y se empacaron dos con escoria volcánica y dos con grava con diferentes estratos según el diámetro de partícula utilizado, siguiendo las recomendaciones hechas por la norma austriaca para la construcción de HA (Önorm B 2505, 1997). Para definir los volúmenes y los intervalos de alimentación se siguieron también estos criterios, con el fin de estandarizar el mayor número de variables en el experimento:



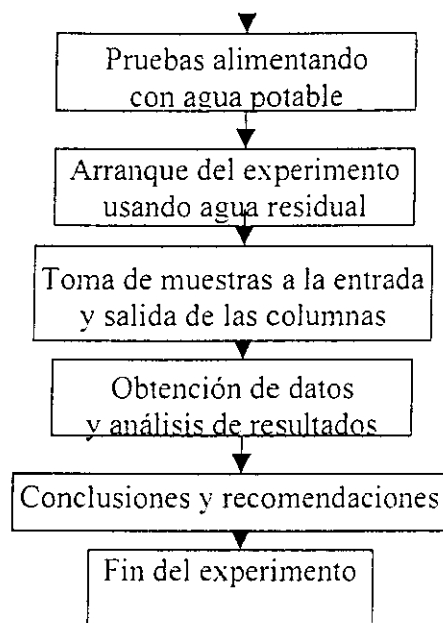


Figura 3.1. Secuencia de actividades para los experimentos en columnas empacadas

Las cuatro columnas, como ya se dijo, se construyeron con tubería de PVC de 15 cm de diámetro y con longitud de 1.10m de longitud. En el fondo de éstas se colocaron tapas del mismo material y se introdujo un tramo de 20 cm de longitud y diámetro de 2 pulgadas perforada con el fin de drenar el agua que se percolará del interior de la columna. En el extremo exterior de esta tubería se colocó un embudo conectado a una manguera de plástico, con la cual se pudiera controlar el nivel de inundación en el interior de la columna, utilizándola como un sifón. La disposición y la construcción de este equipo se ilustran en las Figuras 3.2 y 3.3.

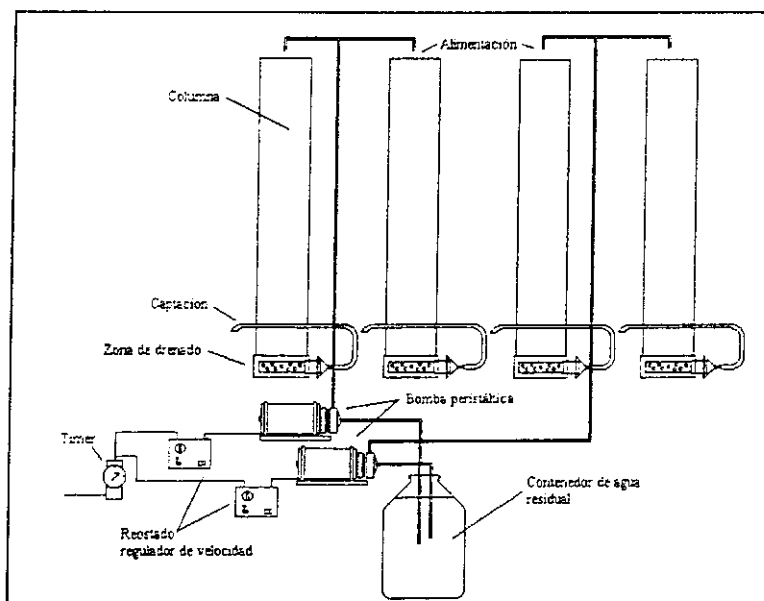


Figura 3.2. Instalación de las columnas y conexión del equipo

Para alimentar las columnas se utilizaron dos bombas peristálticas que transportaban por medio de mangueras el agua residual a la parte superior de las columnas, donde el agua goteaba sobre un pequeño plato metálico con el fin de evitar la formación de rutas preferenciales de flujo o cortos circuitos a través del material de empaque. La alimentación se hacía periódicamente en intervalos de 30 minutos cada 6 horas. Los intervalos de alimentación se controlaron utilizando un "timer" (controlador de tiempo) convencional de los que se usan para controlar el encendido y apagado de lámparas o equipos de sonido en el hogar.

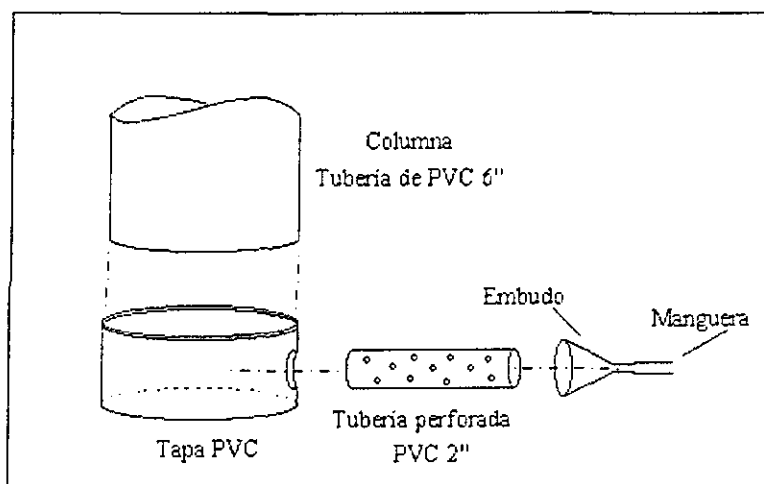


Figura 3.3. Detalle de la construcción de las columnas

Para empacar las columnas, el material se adquirió en forma bruta y se seleccionó de acuerdo con el diámetro granular requerido, de manera manual, utilizando tamices con apertura de malla de los respectivos calibres.

El material previamente seleccionado por diámetro granular, se acomodó en el interior de las columnas formando diferentes perfiles o estratos de acuerdo con lo recomendado con la norma austríaca referente al diseño y construcción de HAFV, esta distribución se muestra en la tabla 3.1.

Tabla3.1. Distribución del material de empaque dentro de las columnas

Diámetro granular (mm)	Grosor del estrato (cm)	Altura relativa a la parte inferior de la columna (mm)
4 – 8	20	110
0.5 – 4	60	90
4 – 8	10	30
12 – 16	20	20

Para determinar en volumen, la cantidad de material seleccionado que se usaría en cada una de las columnas se realizó el siguiente cálculo:

$$V = \pi * (d/2)^2 * h \quad (1)$$

donde:

V: Volumen de material (cm³)

d: Diámetro de la columna (15 cm)

h: Grosor del estrato respectivo (cm)

De este modo se obtuvieron los valores por cada columna que se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla3.2. Tamaño de partícula y volumen de material utilizado en las Columnas en estudio

Diámetro granular (mm)	Cantidad de material utilizado (cm ³)
4 – 8	3.534
0.5 – 4	10.602
4 – 8	1.767
12 – 16	3.534

Para establecer el régimen de alimentación para el experimento, se partió una vez más de lo establecido en la norma austríaca mencionada anteriormente. En dicho documento se establece que, en términos generales, para una remoción de materia orgánica con eficiencia entre 80 y 95%

se requiere de un área superficial de alrededor de 3 – 5 m² por cada habitante. Lo anterior suponiendo que cada uno de ellos produce diariamente 150 L de agua residual, con concentración de materia orgánica P.e = 65g DBO₅/día, (433mgDBO₅/L). Partiendo de esto, y sabiendo que:

$$A = \pi * (d/2)^2 \quad (2)$$

donde:

A: Área superficial de la columna (m²)

d: diámetro de la columna (m)

$$A = \pi * (0.15/2)^2 = 0.0177\text{m}^2$$

De este dato, para calcular el volumen diario de alimentación:

$$V_d = 0.0177\text{m}^2 * (150 \text{ L}/3\text{m}^2) = 0.885 \text{ L}$$

Si este es el volumen que debe alimentarse diariamente y se hacen 4 alimentaciones cada 6 horas, el volumen de alimentación para cada periodo es:

$$V = 221 \text{ mL}$$

3.1.2 Procedimiento experimental

Para estudiar el comportamiento de las columnas, durante el periodo de duración del experimento, de alrededor de mes y medio, se midieron constantemente tres variables principalmente: Los valores de entrada y salida de DBO₅, DQO y sólidos totales (STT). Las muestras se tomaban cada 4 o 5 días, debido a la limitante que representa la duración de la prueba de DBO₅.

Antes del arranque de esta fase de la experimentación se realizaron algunas pruebas preliminares para definir algunos parámetros importantes de comparación entre los dos materiales de empaque por estudiar. Estas pruebas fueron básicamente la medición de la porosidad del material de empaque, el tiempo de residencia hidráulico dentro de las columnas ya construidas y la toma de muestras de DBO₅, DQO y STT a la salida de las columnas utilizando agua potable. Las pruebas

de contenido de materia orgánica y sólidos totales basándose en lo establecido en los métodos estándar americanos (APHA, 1992) y para la porosidad y tiempo de residencia hidráulica. los procedimientos que se siguieron se listan a continuación de manera breve y resumida.

Porosidad

Se entiende por porosidad, el porcentaje de espacio vacío que existe dentro de la columna debido a las características granulares del material con el que se empaca. La porosidad se midió con la columna ya empacada y con los estratos ya contruidos y no con cada uno de los diferentes diámetros granulares por separado, siendo mas útil para la caracterización de un HA hacerlo de esta manera. El porcentaje de porosidad se define por la siguiente igualdad:

$$\% \text{ porosidad} = (\text{volumen de espacios huecos} / \text{volumen empacado total}) * 100$$

Para determinar este valor, en cada una de las columnas una vez empacada, se colocó un tapón en la salida de la misma y se fue agregando agua muy lentamente con el fin de desplazar todo el aire contenido dentro de los espacios porosos del material y una vez alcanzado el nivel superior del material de empaque sin que el volumen de agua variara se procedió a drenar el agua del interior de las columnas para, posteriormente, medir su volumen. Esta prueba se realizó por duplicado para cada una de las columnas y los valores se promediaron.

Tiempo de residencia hidráulica

Es el tiempo que tarda un volumen conocido de agua en atravesar todo el lecho con el que se empaca la columna. En términos prácticos se consideró terminada la prueba cuando se obtenía a la salida de la columna un 95% del volumen total de agua agregada.

Para esta prueba se utilizó un volumen conocido de agua de 500 mL, que se introducía en la parte superior de la columna en un tiempo $t = 0$ y se cronometraban tres diferentes tiempos con el fin de poder construir el perfil del comportamiento hidráulico del material. Estos tiempos se medían cuando se completaban 100, 250 y 500 mL percolados a través de la columna. Estas pruebas se realizaron por duplicado en cada columna y los resultados se promediaron para su análisis e interpretación.

Para realizar el estudio comparativo de la remoción de contaminantes utilizando dos materiales distintos, se evaluaron tres variables útiles para tener una idea de la respuesta de cada uno de estos. La metodología para manipular las muestras se describe en el anexo al final de este documento y los resultados obtenidos y su interpretación se presentan a continuación.

3.1.3 Resultados

Porosidad

Tras haber realizado las mediciones de porosidad de los materiales de acuerdo con la metodología descrita anteriormente se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.3. Estos valores se expresan promediados por el número de corridas realizadas.

Tabla 3.3. Porcentaje de porosidad de los diferentes materiales de empaque

COLUMNA	% DE POROSIDAD
Escoria volcánica 1	49.7
Escoria volcánica 2	48.0
Grava 1	46.3
Grava 2	45.2

Tiempo de residencia hidráulica

En las Tablas 3.4 y 3.5 se muestran los resultados obtenidos tras la medición del tiempo de residencia en el interior de las columnas. En la primera, se expresan los valores de dos corridas realizadas en cada una de las columnas, respectivamente y, en la Tabla 3.5, los valores promediados de ambas corridas y promediados también con los de ambas columnas con el mismo material.

Los valores que aparecen en la tabla corresponden a los tres registros de tiempo a diferentes valores de flujo a través del material de empaque. El tiempo no está expresado en minutos y segundos sino en fracciones decimales, con el fin de facilitar su graficación e interpretación.

Tabla 3.4. Tiempo de retención hidráulica, en fracciones de minutos, para cada una de las columnas.

Tiempo				
Efluente	E V 1	E V 2	Grava 1	Grava 2
100mL	4	2.58	0.92	1.08
250mL	11.33	10.5	1.67	2
500mL	77	78.5	17.5	16.5
100mL	3.25	3	1.33	1.5
250mL	10	9.75	2.5	2.75
500mL	75.5	77.75	16.75	16

Tabla 3.5. Tiempo de retención hidráulica para cada una de las columnas (Promediado), en fracciones decimales de minutos

tiempo		
Efluente (mL)	E V	Grava
100	3.20±0.11	1.20±0.29
250	10.39±0.73	2.23±0.56
500	77.18±0.79	16.68±0.44

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la medición del comportamiento de las cuatro columnas, medidos como STT, DBO₅ y DQO, respectivamente. Los valores se presentan tanto para cada una de las corridas realizadas, en todas las corridas como de sus promedios de acuerdo con el tipo de material de empaque utilizado.

Tabla 3.6. Sólidos totales a la salida de las columnas

	E V 1	E V 2	Grava 1	Grava 2
Día	STT (mg/L)			
4	2200	2080	4960	4320
11	2660	2480	4240	4640
18	4900	4560	7920	7280
23	5160	4760	7040	7120
29	6160	5360	7000	6040
39	6080	6360	7760	7660
45	6540	6560	7240	7560

Tabla 3.7. Sólidos totales a la promediados salida de las columnas

día	E V	Grava
	STT (mg/L)	
4	2140±84	4640±452
11	2570±127	4440±282
18	4730±240	7600±452
23	4960±282	7080±56
29	5760±565	6520±678
39	6220±197	7710±70
45	6550±14	7400±226

Tabla 3.8. Materia orgánica a la salida de las columnas medida como DBO₅

	E V 1	E V 2	Grava 1	Grava 2	Alimentación
día	DBO ₅ (mg/L)				
4	52.3	61.3	106.6	116.6	228.7
11	55.7	18.6	62.5	78.2	227.6
18	28.5	23.4	27.3	36.7	240
23	26	14.7	14.8	17.4	215.9
29	8.1	18	14.1	11.2	205.8
39	9.6	11.2	11.2	13.5	275.2
45	9.5	6.5	12.9	16	291.1
49	9.3	6.2	12.7	12.4	250.1

Tabla 3.9. Materia orgánica a la salida de las columnas medida como DBO₅, valores promediados

	E V.	Grava	Alimentación
día	DBO ₅ (mg/L)		
4	56.8±6.36	111.6±7.07	228.7
11	37.15±26.23	70.35±11.10	227.6
18	25.95±3.60	32±6.64	240
23	20.35±7.99	16.1±1.83	215.9
29	13.05±7.00	12.65±2.05	205.8
39	10.4±1.13	12.35±1.62	275.2
45	8±2.12	14.45±2.19	291.1
49	7.75±2.19	12.55±0.21	250.1

Tabla 3.10. Porcentaje de remoción de materia orgánica a la salida de las columnas medida como DBO₅

	E. V.	Grava
día	% de remoción	de DBO ₅
4	75.16	51.2
11	83.7	69.1
18	89.18	86.67
23	90.57	92.54
29	93.65	93.85
39	96.22	95.51
45	97.25	95.03
49	96.9	94.9

Tabla 3.11. Materia orgánica a la salida de las columnas medida como DQO

	E. V. 1	E. V. 2	Grava 1	Grava 2	Alimentación
día	DQO (mg/L)				
4	99.6	112.9	197.6	215.9	423.6
11	104.6	36.4	117.5	144.5	420.4
18	54.6	41.4	50	68	442.5
23	52.9	28.1	28.3	13.1	402.1
29	13.1	31.4	26.4	19.8	378
39	19.8	19.8	21.5	24.8	508.6
45	18.5	14.1	24.8	29.7	538.4
49	23.2	22.4	33.1	23.1	461.9

Tabla 3.12. Porcentaje de remoción de materia orgánica a la salida de las columnas medida como DQO

	E. V. 1	E. V. 2	Grava 1	Grava 2
día	% de	remoción	DQO	
4	76.5	73.4	53.4	50
11	75.1	91.3	72.1	65.6
18	87.7	90.6	88.7	84.6
23	86.8	93	93	96.7
29	96.5	91.7	93	94.8
39	96.1	96.1	95.8	95.1
45	96.6	97.3	95.4	94.5
49	95	95.2	92.8	95

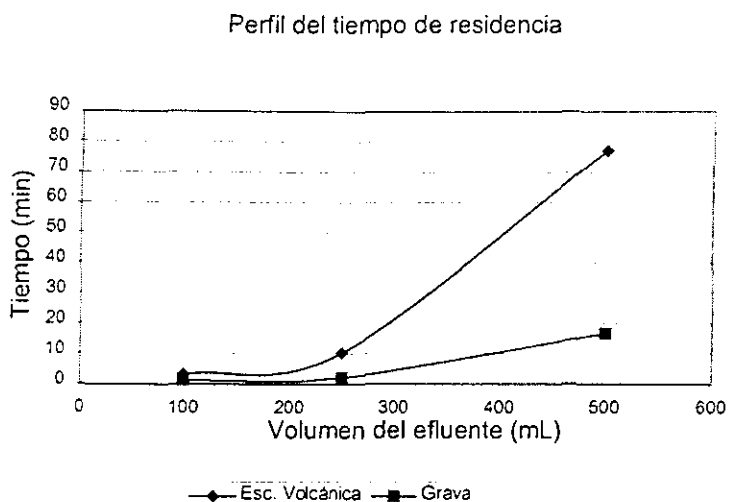
Tabla 3.13. Porcentaje de remoción de materia orgánica a la salida de las columnas medida como DQO, valores promediados

	E. V.	Grava
día	% de remoción DQO	
4	74.95±2.19	51.70±2.40
11	83.2±11.45	68.85±4.59
18	89.15±2.05	86.65±2.89
23	89.9±4.38	94.85±2.61
29	94.1±3.39	93.9±1.27
39	96.1±0.0	95.45±0.49
45	96.95±0.49	94.95±0.63
49	95.1±0.14	93.9±1.55

3.1.4 Discusión y conclusiones

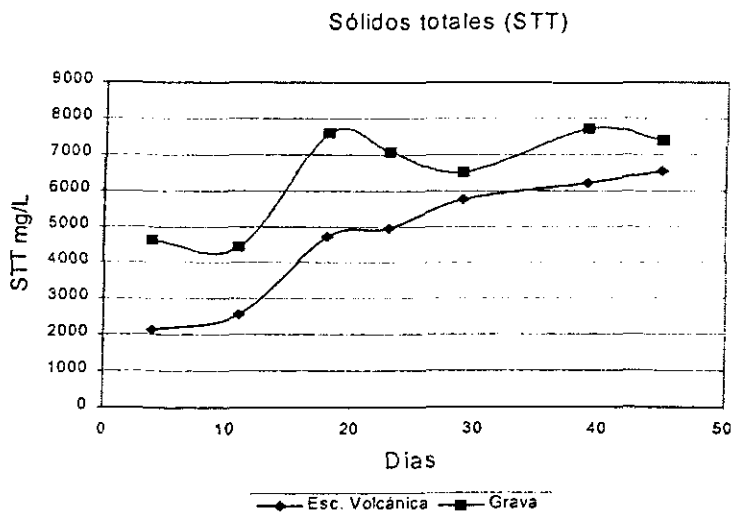
Considerando que el objetivo de este experimento en columnas fue el de comparar las características de dos materiales para empacar el lecho del humedal artificial con el fin de seleccionar el más adecuado y que se ajustara mejor a las condiciones de operación de la región de México donde se instalará el sistema, el propuesto por la norma austriaca para la construcción de HAFV y el material propuesto que ya había sido evaluado en algunas de sus características (Ramírez-Carrillo y col., 1997) al parecer, el primero, cuenta con ventajas significativas, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

En la gráfica 3.1. se muestran los valores del tiempo de residencia hidráulica tomados de los promediados en la Tabla 3.5. En esta gráfica se ven comparados los dos perfiles del tiempo de residencia, para el caso de la grava, el agua es desalojada mucho más rápidamente de lo que se desaloja en el caso de la escoria volcánica y, al final de la corrida, el tiempo que permanece el agua dentro del lecho de escoria volcánica es casi cinco veces mayor que el tiempo dentro de las columnas de grava. Esto se debe a la muy alta porosidad microscópica de la escoria volcánica que aunque no es significativamente mayor a la de la grava, como puede verse en la tabla de resultados de porosidad, sí genera una mayor cantidad de superficie de contacto lo que retrasa el escurrimiento del agua. No obstante que, por el momento, las pruebas son escasas, permiten suponer que la porosidad tiene influencias positivas en la operación de humedales a largo plazo o en equipos ya estabilizados. De acuerdo con estudios realizados previamente (Ramírez, 1998), la porosidad del material favorece el depósito de materia orgánica sobre la superficie de las partículas funcionando como un filtro, lo que también favorece la capacidad de contener microorganismos, aumentando así el porcentaje de remoción de materia orgánica presente en el agua residual que se introduce. Por otro lado, si esta capacidad de retención de agua perdura aún después de que el material de empaque se encuentre poblado de microorganismos, al ser tan alto el tiempo de residencia de la materia orgánica dentro del lecho se aumentaría el tiempo de contacto entre materia orgánica y microorganismos lo que trascendería también en un aumento de la eficiencia de remoción.



Gráfica 3.1. Tiempo de retención hidráulica para grava y escoria volcánica

En la gráfica 3.2, que se despliega a continuación, se muestra el comportamiento de ambos tipos de columnas en términos de los sólidos totales medidos a la salida de las mismas. Los valores de STT en la alimentación se encontraron invariablemente entre los 8200 mg/L y los 9300 mg/L y las lecturas realizadas no presentaron valores fuera de este intervalo.



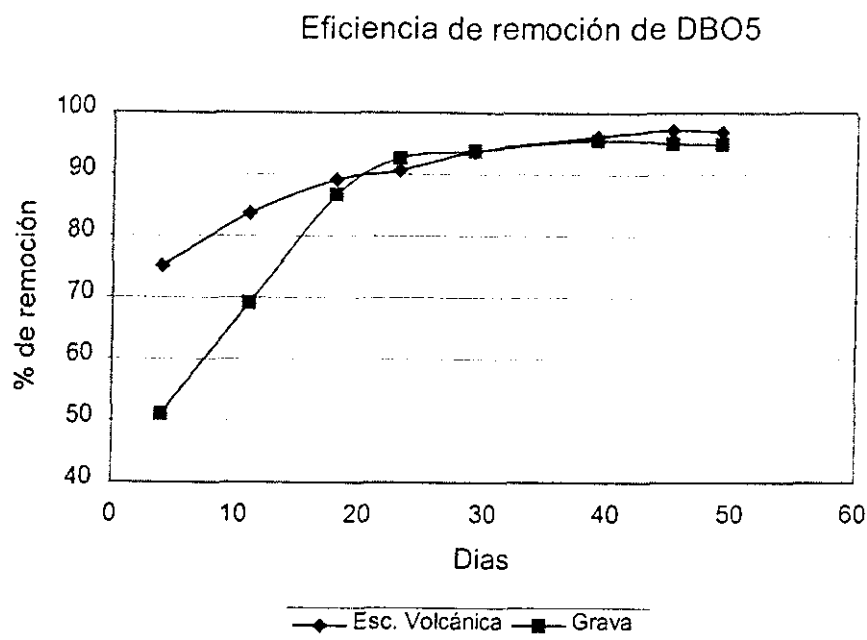
Gráfica 3.2. Sólidos totales en las cuatro columnas medidos a la salida de las mismas

Dadas las características de los materiales utilizados en el experimento debe mencionarse que la cantidad de sólidos medidos a la salida de las columnas no depende únicamente de la cantidad de sólidos alimentados, sino también de la cantidad de estos presentes en el material y que pueden ser arrastrados (“lavados”) por el flujo de agua a través del lecho. Este efecto de arrastre puede ser mayor en el caso de las columnas empacadas con escoria volcánica que en las empacadas con grava, esto debido a la relativa fragilidad de la primera como consecuencia de la alta cantidad de espacios porosos que presenta.

En la gráfica se observa claramente que el comportamiento de ambos materiales sigue un perfil similar, con un aumento considerable en la fase inicial antes de los primeros 20 días y una relativa estabilización después de estos y en la etapa final del experimento. Llama la atención que, contrariamente a lo que se esperaba, la cantidad de sólidos medidos en las columnas de grava es superior a los medidos en las de escoria volcánica. Siendo la escoria volcánica un material mucho más poroso y quebradizo, era de esperarse que al inicio del experimento la cantidad de sólidos obtenidos formados principalmente por polvo del mismo material fuera significativamente superior en estas columnas que en las de grava. En este sentido debe tenerse cuidado en la interpretación que se dé al resultado ya que a primera vista significaría que este polvo no es por sí mismo una variable que determine la posibilidad de utilizar este material en la construcción del HAFV, dado que no repercute en un incremento de sólidos cuyas cantidades sean superiores a los de la grava, que es el material comúnmente usado.

La constante diferencia comparativa en la cantidad de sólidos en las columnas, aunque no implica forzosamente una alta eficiencia en la remoción de los mismos, sí hace evidente que la capacidad de retención de sólidos de la escoria volcánica favorece el soporte de biomasa que, una vez equilibrado el sistema, se reflejará en una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual.

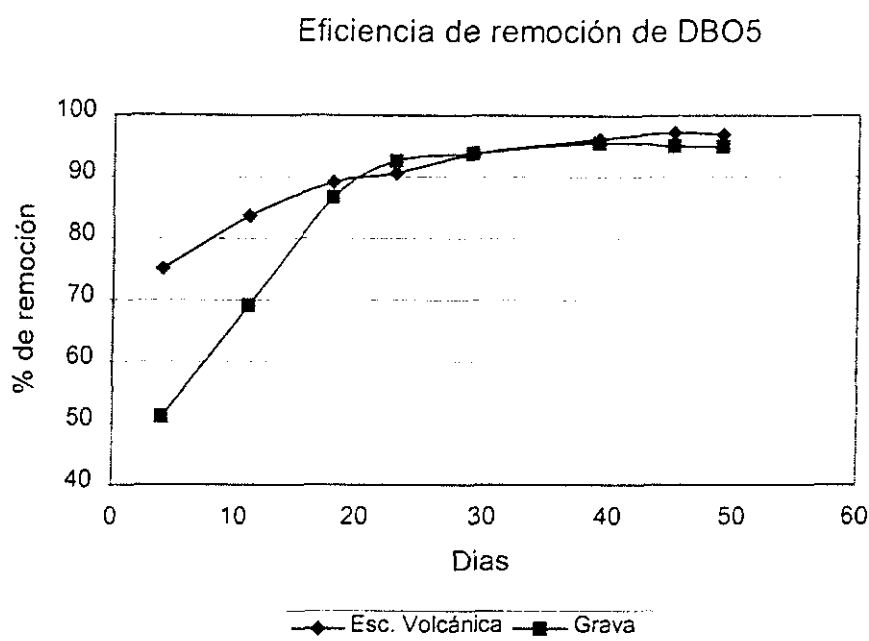
En las gráficas 3.3 y 3.4 se muestran los valores de eficiencia de remoción de DBO_5 y DQO respectivamente, comparando en cada una de ellas el comportamiento de ambos materiales.



Gráfica 3.3. Comparación de la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DBO_5 para ambos materiales de empaque

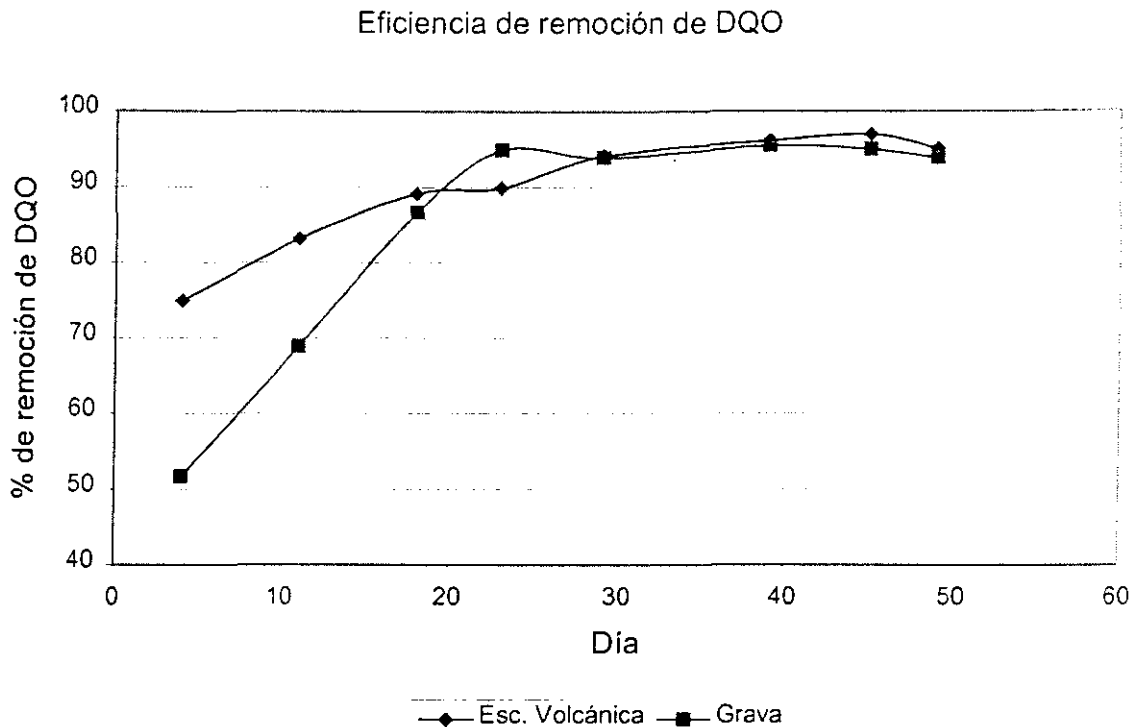
En ambas gráficas puede verse que la eficiencia de remoción de materia orgánica es superior utilizando escoria volcánica pero después del vigésimo día de operación en ambos casos los materiales se comportan de la misma manera.

En las gráficas 3.3 y 3.4 se muestran los valores de eficiencia de remoción de DBO_5 y DQO respectivamente, comparando en cada una de ellas el comportamiento de ambos materiales.



Gráfica 3.3. Comparación de la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DBO_5 para ambos materiales de empaque

En ambas gráficas puede verse que la eficiencia de remoción de materia orgánica es superior utilizando escoria volcánica pero después del vigésimo día de operación en ambos casos los materiales se comportan de la misma manera.



Gráfica 3.4. Comparación de la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DQO para ambos materiales de empaque

En este documento se hace mención repetidas veces que el verdadero efecto de remoción de materia orgánica tiene lugar una vez que los microorganismos se encuentran depositados sobre el material de soporte. La bibliografía consultada determina que el equilibrio se obtiene después de un año completo de operación. En tal caso, con este experimento no se puede predecir realmente cuál de los dos materiales dará mejores resultados con base únicamente en las lecturas de DBO_5 y DQO que se muestran en las dos gráficas anteriores pero, ponderando todos los resultados de la prueba puede suponerse que la escoria volcánica es un material tanto o más adecuado que la grava para la construcción de HAFV. Es importante destacar que un criterio importante para la selección de este material es su alta disponibilidad en la zona de estudio.

3.2 Evaluación costo-beneficio

No obstante que en este documento se plantea un proyecto con fines experimentales que aporte información de utilidad en el caso de que se desee realizar la construcción de un HAFV con dimensiones reales resulta conveniente que en este capítulo se proceda más que a realizar un análisis de los costos asociados, poner de manifiesto la utilidad que representa para el estudio de los humedales artificiales en general la construcción de este sistema haciendo mención de los costos involucrados con su construcción.

De este modo, los costos considerados para la realización de este proyecto involucran únicamente como costos directos los costos de procura de materiales y equipo en el momento de su cotización, o en su defecto, cuando se trate de material obtenido de las aportaciones de la Dirección General de Obras, se tomó como referencia el precio comercial de estos materiales.

Para la estimación de los costos de construcción se parte de la lista de actividades que se encuentra en el subcapítulo de planeación del capítulo 4 y considerando una jornada completa aquella que consiste en tres trabajadores para cada uno de los días que se estima dura el proyecto de construcción. Para los cálculos correspondientes, considerando que todo el trabajo manual fuera realizado por empleados de la Universidad Nacional Autónoma de México, se tomó como base el sueldo promedio de uno de estos trabajadores.

A continuación se muestra, en la Tabla 3.14, la lista de precios de los materiales necesarios para la construcción del tren de tratamiento. Esta lista se realiza con base en la lista de materiales presente en el capítulo 5 en la Tabla 5.6 en este mismo documento.

Tabla 3.14. Lista de precios para materiales y equipo

DESCRIPCIÓN	Precio unitario	Cantidad	Subtotal
Geomembrana PPE 32 mil reforzado color gris/negro, marca Watersaver. Incluido la mano de obra de instalación	115.00	50 m ²	5,790.00
Tanque plástico de 2000 litros	1450.00	1 pza	1450.00
Electrobomba autocebante "Barnes Barmesa" de 1/2 HP 13400L.P.H. (modelo SP5)	2365.00	1 pza	2365.00
Medidor de flujo de chorro múltiple de 1 pulg.	980.00	1 pza	980.00
Válvula Check de 1 ½ pulg.	45.00	1 pza	45.00
Válvula de paso de 1 ½ pulg	40.00	3 pzas	120.00
Válvula de ½ pulg.	20.00	1 pza	20.00
Cople conector macho PVC 1 ½ pulg	12.00	2 pzas	24.00
			5,004.00
Tubería de 3 pulg. de PVC	15.00	9 m	135.00
Manguera flexible de 2 pulg.	25.00	1.5 m	37.50
Codo de 90° de 3 pulg.	5.00	5 pzas	15.00
Tubería de 1 ½ pulg. de PVC	10.00	75 m	750.00
Tubería de 1 pulg de PVC	19.00	7 m	19.00
Reducción de 1 ½ a 1 pulg. de PVC	12.00	1 pza	12.00
Te de 1 pulg de PVC	11.00	2 pzas	22.00
Codo de 1 pulg.	4.00	3 pzas	12.00
Cople-uni3n 1 ½ pulg.	4.00	15 pzas	60.00
Caja enrejada para la protecci3n de la bomba	200.00	1 pza	200.00
Reducci3n 6 pulg. - 3 pulg. PVC	37.00	2 pzas	74.00
Pegamento de PVC 250 mL	22.00	2 pzas	44.00
			1380.50
Tapa y contramarco con bisagra para registro de 50 cm x 50 cm	150.00	1 pza	150.00
Tapa enrejada y contramarco para registro de 1m x 1m	450.00	1 pza	450.00
Cemento	63.00	15 bultos	945.00
Arena	5.00	10 costales	50.00
Granz3n	5.00	5 costales	25.00
Tabique rojo	250.00	½ millar	125.00
			1745.00
Escoria volcánica tamizada de 0.5 - 4 mm		10 m ³	
Escoria volcánica tamizada de 4 - 8 mm		6.5 m ³	
Escoria volcánica tamizada de 8 - 12 mm		2 m ³	
Escoria volcánica en roca		3 m ³	
			1400.00

Tabla 3.14. (Continuación) Lista de precios para materiales y equipo

DESCRIPCIÓN	Precio unitario	Cantidad	Subtotal
Cable calibre 10	190.00	1 rollo	190.00
Interruptor de tijera para fase y neutro	55.00	1 pza	55.00
Fusibles	10.00	4 pzas	40.00
Timer para arranque y paro 24V	350.00	1 pza	350.00
Relé activado por bobina 24V	60.00	2 pzas	60.00
Transformador 115VAC-24VCC	55.00	1 pza	55.00
Relé activado por flotador	250.00	1 pza	250.00
Caja enrejada para la protección del equipo de control	150.00	1 pza	150.00
			1,150.00
		TOTAL	16,469.50

De acuerdo con la lista de actividades que se muestra en el capítulo 4 de planeación, el número total de días hábiles requeridos para la construcción del tren de tratamiento es de 24. Este cálculo de días se realizó pensando en utilizar 3 empleados durante una jornada completa de 8 horas diarias y el salario mínimo es de \$ 35.00, el costo bruto de mano de obra sería de \$ 2520.00. Así el costo total para la construcción del sistema sería:

Costos de materiales	16,469.50
Mano de obra (no incluye seguro social)	2,520.00
TOTAL	\$18,989.50

3.2.1 Utilidad del sistema

La construcción de este sistema de tratamiento de aguas residuales de tipo piloto y, en particular, del HAFV arroja beneficios a corto, mediano y largo plazos que ayudarían por un lado a obtener agua tratada de mejor calidad que la que actualmente se tiene sin el uso del tren de tratamiento. Esta agua tratada puede seguirse infiltrando al subsuelo volcánico o se usada para riego de las áreas verdes cercanas al sitio. Así mismo, con esta investigación se contribuiría al entendimiento del funcionamiento y correcta operación de estos sistemas haciendo posible la medición de

parámetros útiles que se reflejarían en la construcción de humedales más eficientes y que requirieran una menor área para su construcción.

Con este sistema podrían definirse, por ejemplo, los procedimientos más adecuados para el arranque de un HAFV de dimensiones reales, haciendo pruebas de arranque y evaluando los resultados de las mismas. Podrían definirse con exactitud los periodos de estabilización funcional y efectos derivados de las condiciones climatológicas de nuestro país y en particular en esta zona de la Ciudad de México, ya que dichas condiciones repercuten tanto en la velocidad de crecimiento de las plantas vasculares como en el desarrollo de los microorganismos presentes en el material de soporte.

Siendo el HAFV un sistema aerobio y anaerobio simultáneamente, que además opera bajo condiciones de alimentación intermitente y que su capacidad de estabilización depende de largos periodos de tiempo, a través del estudio detallado utilizando un proyecto monitorio bien diseñado, podría finalmente contarse con las herramientas necesarias para la generación de un algoritmo de diseño que simulara de manera correcta el comportamiento de estos sistemas, pues cabe señalar que hasta el momento no se encuentra reportada en la bibliografía ninguna ecuación de diseño confiable debido a que hay variables importantes que no se consideran.

Puede utilizarse también como prototipo para generar un documento que funcione como manual de mantenimiento aplicable a cualquier HAFV y así evitar que en un equipo con dimensiones reales tengan que realizarse procedimientos de mantenimiento correctivo. Ya que las condiciones de operación varían dependiendo de las características climatológicas de la zona en la que se construyen estos sistemas, pueden hacerse también pruebas de respuesta del equipo modificando las condiciones de alimentación, tanto en los volúmenes de alimentación como en la concentración de contaminantes presentes en el agua residual que se alimente, pudiéndose evaluar, inclusive, la capacidad de depuración introduciendo diferentes concentraciones de contaminantes en el torrente de alimentación.

4. INFORMACIÓN TÉCNICA PREVIA

En este capítulo se plantean, las principales consideraciones que dieron origen a este proyecto y se presenta un primer acercamiento a los criterios básicos de diseño, así como a las actividades que deben seguirse para la correcta realización del proyecto de construcción del HAFV, el tiempo de duración estimado para cada una de ellas y el diagrama de avance programado para estas actividades. Es importante señalar que el tiempo de avance teórico acumulado no es comparado con el tiempo real de avance, puesto que, aunque las primeras etapas de construcción del tren de tratamiento ya están siendo realizadas, aún no se conoce el tiempo real de la construcción puesto que ésta no ha terminado todavía.

La planeación de las actividades que permitirán la construcción del sistema fue generada principalmente en función de la experiencia acumulada durante la construcción de un sistema piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal en los Viveros de Coyoacán (Jiménez-Tovar, 1999; Ramírez-Carrillo y col., 1997; Schaller 1998) así como en la bibliografía relacionada con el tema de ingeniería y administración de proyectos (Perry, 1982; Rase, 1973).

4.1. Justificación del proyecto

Una vez concientes de que los HA son sistemas que, dadas sus características, pueden resultar de gran utilidad para el tratamiento de aguas residuales domésticas y siguiendo la trayectoria de las investigaciones realizadas por el Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM (PIQAYQA) para estudiar las características del funcionamiento de estos equipos y de este modo ser capaces de operarlos en diversas regiones de México y de otros países puede explicarse entonces el interés por diseñar y construir el tren de tratamiento experimental que se detalla en este documento. Para continuar con el desarrollo en el estudio de los HA surge la necesidad de contar con un HAFV con dimensiones de “equipo piloto” que fuera suficientemente pequeño como para ser operado y evaluado con facilidad y, a su vez, lo suficientemente grande como para que los datos obtenidos tras su operación sean

significativos y puedan considerarse útiles para poder escalar humedales artificiales a mayores dimensiones que funcionen con el mismo principio.

Un criterio adicional importante para planear la construcción de este sistema es que éste sea construido y operado dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria con el fin de facilitar el acceso a éste y así tener un adecuado control monitorio de su comportamiento depurativo.

Para esto, se estableció contacto con la Dirección General de Obras y Servicios Generales de la UNAM en la Ciudad Universitaria (DGOySG), con cuyo personal se procedió a establecer los primeros criterios de diseño. Tomando en cuenta las necesidades y la infraestructura existente para la construcción del tren de tratamiento; la selección del tren de tratamiento más adecuado; se asignó la zona para la construcción del mismo y se definieron cuáles serían las corrientes de las que se tomarían los flujos de alimentación para dicho tren de tratamiento.

4.2. Selección y caracterización del terreno

La zona asignada para la construcción del HAFV se encuentra situada al sur de la Ciudad Universitaria, en lo que se conoce como la Zona Cultural, en la parte posterior del “Edificio de Conservación de Áreas Verdes” (ver Figura 4.3). En este sitio está construido también un planchón de concreto de aproximadamente 150m x 150m. Éste se construyó con la finalidad de producir composta a partir de los residuos generados por los trabajos de poda y jardinería de las áreas verdes de la Ciudad Universitaria. Debido a la irregularidad del terreno y a que se encuentra sobre pedregal volcánico, para la construcción de dicho planchón se hizo una nivelación de la zona utilizando cascajo y tierra arcillosa. En este contexto el sitio asignado para instalar el HAFV es uno de los costados de nivelación donde se realizó la excavación.

Como el terreno se encuentra formado por material de relleno, inicialmente resulta más fácil excavar en él que en el suelo natural bien compactado, pero esto, como se explicará más adelante, también presenta problemas para la construcción del HAFV, por lo cual fue necesario resolver estos problemas durante el diseño del sistema.

Por otra parte, las corrientes de alimentación para el HAFV serán tomadas de dos efluentes provenientes de los baños ubicados en el edificio de los talleres de conservación de áreas verdes de la zona cultural. Una de las corrientes, la proveniente de los excusados, pasa a una fosa séptica y posteriormente se infiltra en el subsuelo por escurrimiento a través de una grieta. La otra corriente proviene de regaderas y es descargada directamente a la misma grieta, las tuberías de estas corrientes se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2, respectivamente.



Figura 4.1. Aspecto actual de la tubería de descarga proveniente de regaderas



Figura 4.2. Aspecto actual de la fosa séptica que recibe la descarga proveniente de excusados

La salida de ambas corrientes se encuentra en una zona muy accidentada y, por disponibilidad de espacio, el HAFV será construido a 65 metros de este punto, aprovechando un área que se encuentra cubierta por material de relleno apisonado. Para una mejor ubicación de esta zona, se muestra, en la Figura 4.3, un mapa donde se señala el lugar asignado para los fines ya mencionados.

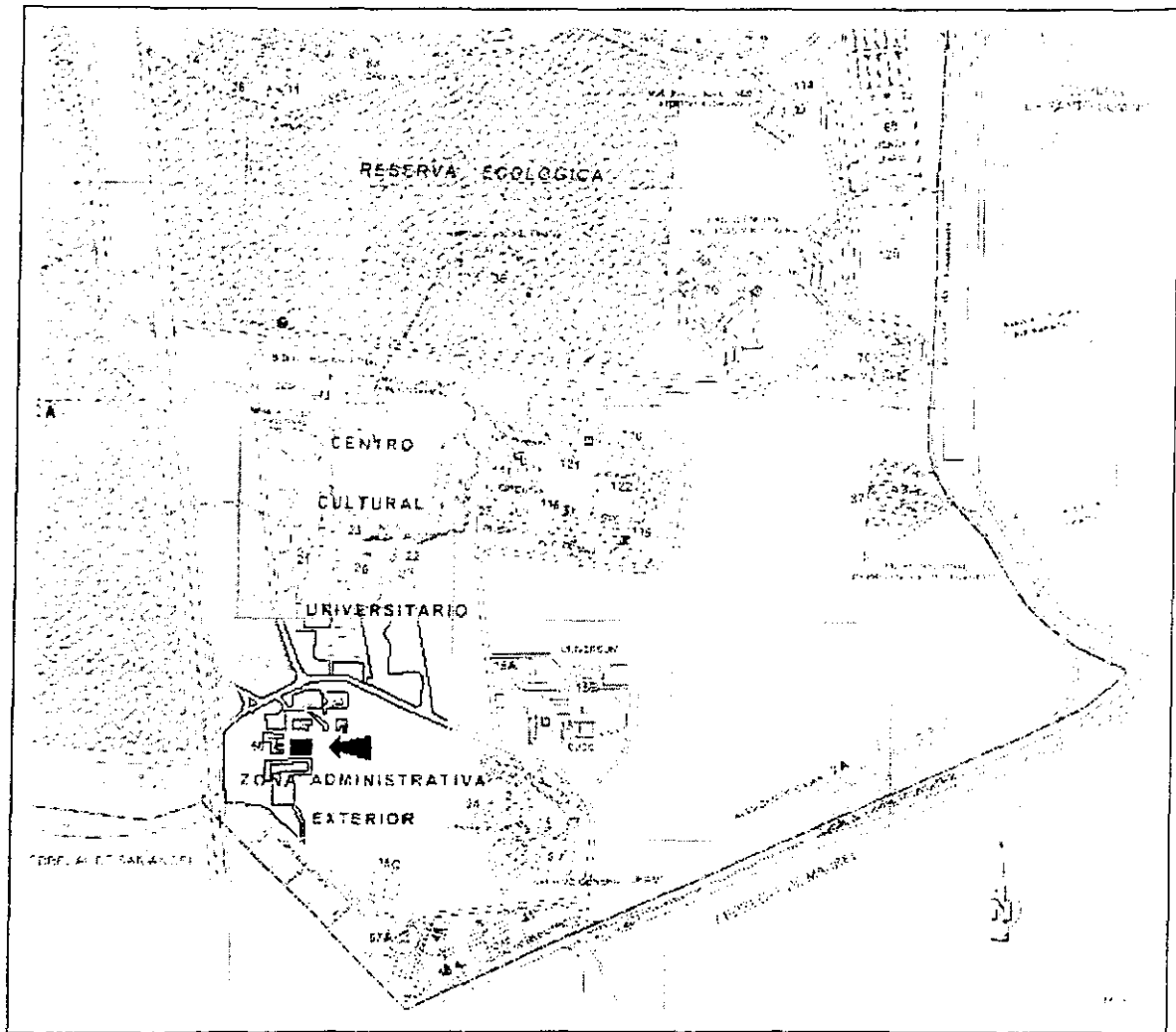


Figura 4.3. Ubicación en el mapa de la Ciudad Universitaria (parte sureste) la zona asignada para la construcción del HAFV

4.3. Selección del tren de tratamiento

Es importante destacar que el objetivo principal para la construcción de este sistema de tratamiento es contar con un humedal artificial a escala piloto que permita obtener datos relevantes en la construcción de estos sistemas a mayor escala, así como tener la posibilidad de evaluar el comportamiento de éstos modificando variables de interés con el fin de adaptarlos a las características y requerimientos de diferentes zonas rurales y semiurbanas de la República Mexicana. Esto posiblemente despierte el interés de aplicarlos de manera general en el tratamiento de aguas residuales generadas dentro del campus universitario, principalmente en aquellos lugares donde no se cuenta con conexión al drenaje colector central. La puesta en marcha de este tren de tratamiento ayudará a evitar que se infiltren las aguas residuales sin tratamiento previo, las cuales contaminan los mantos acuíferos de Ciudad Universitaria, pues el agua con la que operará este sistema es agua que actualmente se descarga a una enorme grieta, a través de la cual se infiltra al subsuelo. En este sentido se espera que el HAFV tendrá como efluente agua con calidad de riego para jardines y áreas verdes aledaños al mismo las cuales actualmente son regadas con agua potable.

Un importante criterio para la selección del tren de tratamiento y de la zona para su construcción es contar con las características necesarias para operar el HAFV bajo las mejores condiciones posibles en un área de poco acceso al público y que pueda estar bajo resguardo constante. El diseño del HAFV debe contemplar, entre otras cosas, un adecuado control del influente para evitar su inundación y encharcamiento en la parte superior del humedal. Dichos encharcamientos pueden deberse a la presencia excesiva de sólidos suspendidos (Brix, 1994). La bomba de alimentación del HAFV es otro de los equipos que sufre desgaste y detrimento por la presencia excesiva de sólidos. Por este motivo es que una parte importante en la conceptualización del tren de tratamiento es la eliminación de sólidos en suspensión, para lograr una operación adecuada y a prueba de fallas. Otros criterios importantes para la selección del tren de tratamiento adecuado son los siguientes:

- Las características fisicoquímicas de agua que se tratará.

- La calidad de agua que se desea obtener al final del tratamiento.
- La adecuada selección de la zona para la construcción del sistema.
- El estudio de los costos de inversión y la evaluación técnico económica.
- La construcción y disposición de los sistemas y accesorios involucrados, con el fin de que requieran bajos costos de operación y mantenimiento.
- Las condiciones climatológicas y topográficas de la zona seleccionada para la construcción del sistema.
- Incluir puntos para la toma de muestra en los sitios de mayor interés del proceso, así como en varios puntos dentro del HAFV.

Tomando en cuenta lo antes mencionado el tren de tratamiento consiste en general de las tres etapas siguientes.

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario

El pretratamiento consiste en una fosa séptica que ya se encontraba en el lugar y que recibe el agua proveniente de excusados exclusivamente. Esta fosa, como se describe más adelante con detalle, retira una cantidad considerable de los sólidos sedimentables presentes en el agua y da un tratamiento biológico que permite eliminar entre el 10 y 25% de materia orgánica, medida como DBO_5 . Cabe señalar que aunque esta fosa cuenta con las características adecuadas para un buen pretratamiento, operando de manera aislada, que es como lo hace actualmente, no es capaz de eliminar correctamente los contaminantes del agua, pues su volumen es insuficiente, es decir, ha sido sobrepasada su capacidad de diseño.

El tratamiento físico está formado por un tanque sedimentador de fondo cónico, en el cual se homogeneizan la corriente de salida de la fosa séptica y la que proviene de regaderas. Esta última es alimentada directamente al sedimentador. En este equipo se retiene el resto de sólidos sedimentables, los sólidos flotantes y las natas sobrenadantes, esta separación física minimiza el desgaste de la bomba que debe surtir intermitentemente al HAFV.

De manera general, se tiene previsto que los lodos retirados durante el tratamiento primario se pongan a disposición del personal encargado del área de composta situada a un costado del sistema, con el fin de darles un tratamiento de estabilización adecuado evitando complicaciones posteriores por la presencia de estos lodos.

4.4. Planeación

A continuación se expresan las actividades que deben seguirse para lograr el cumplimiento del objetivo de *construir un HAFV piloto con las características que ya se han mencionado anteriormente*. Estas actividades están agrupadas en las siguientes fases de la ejecución del proyecto:

- Inicio y planeación del Proyecto
- Diseño básico
- Diseño en detalle
- Procuración de equipo, materiales y accesorios
- Construcción
- Puesta en marcha
- Terminación del proyecto

4.4.1. Ruta crítica para la construcción del HAFV

En el diagrama de la Figura 4.5 se presentan de manera general las actividades necesarias para la construcción del HAFV. El objeto de este diagrama es mostrar la secuencia de estas actividades y

la cronología que debe seguirse conociendo la relación de dependencia que existe entre una y otra colocadas en un orden progresivo de ejecución.

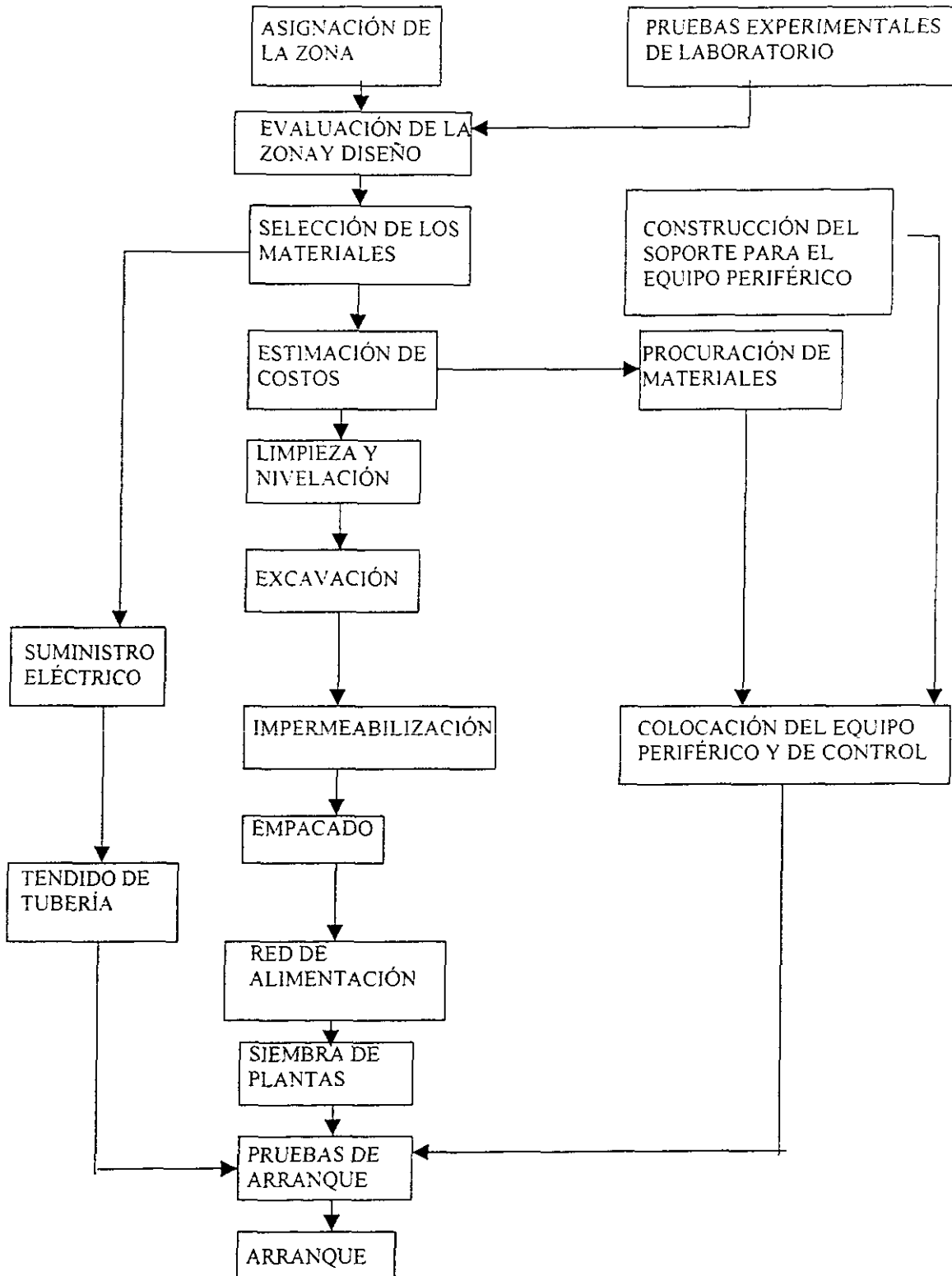


Figura 4.5 Ruta crítica para la construcción del tren de tratamiento

4.4.2. Lista de actividades

En esta lista se expresan pormenorizadamente cada una de las actividades necesarias para la construcción del tren de tratamiento relacionado con el HAFV de la Ciudad Universitaria. Aunque el desarrollo del mismo presenta una gran flexibilidad, es importante procurar que la construcción se haga de acuerdo con el listado y de manera progresiva, motivo por el cual se agrega una columna de actividades previas. Esto se muestra también, aunque de manera menos detallada, en la ruta crítica de actividades.

Tabla 4.1. Lista de actividades que indica la duración en días de cada una

	ACTIVIDAD	DURACIÓN días	ACTIVIDAD PREVIA
	Arranque del proyecto	12	
1	Asignación de la zona	1	-
2	Toma de muestras	1	1
3	Análisis de muestras	6	2
4	Resultados	1	3
5	Análisis de resultados	1	4
6	Selección del tipo de tratamiento	2	5
	Diseño básico	18	
7	Bases y criterios de diseño	3	5,6
8	Descripción del sistema, incluyendo accesorios	2	7
9	Diseño del sistema y selección de accesorios	3	8
10	Especificación de materiales y equipo	2	8,9
11	Determinación de servicios auxiliares	1	7
12	Descripción topográfica de la zona	2	1
13	Descripción climatológica de la zona	3	1
14	Balance general de materia	1	7
15	Diagrama de flujo de proceso	1	7,8,9,10,13,14
	Diseño en detalle	11	
16	Descripción detallada del sistema	2	15
17	Lista de materiales, equipo y accesorios	1	15,16
18	Diagrama de tubería e instrumentación	3	8
19	Diagrama de regulación	1	18
20	Diagrama de potencia y conexiones	1	22
21	Diagrama isométrico de tuberías	1	18

Tabla 4.1. (Continuación) Lista de actividades que indica la duración en días de cada una

	ACTIVIDAD	DURACIÓN días	ACTIVIDAD PREVIA
22	Diagrama de equipo y conexiones	2	18
	Procuración de equipos, materiales y accesorios	19	
23	Especificación de equipos materiales y accesorios	5	20, 21, 22
24	Análisis técnico económico	1	23
25	Selección de proveedores	3	24
26	Inspección de materiales y equipo	2	25
27	Transporte y entrega de materiales y equipo	8	25
	Construcción	25	
28	Limpieza y acondicionamiento del área	3	22
29	Excavación, relleno y apisonamiento	3	22, 28
30	Construcción de piso y paredes para el HAFV	4	29
31	Construcción de pisos y soportes para el equipo	1	28
32	Construcción de muertos para el tendido de tuberías	1	28
33	Colocación de la geomembrana	1	30
34	Instalación del equipo	5	31
35	Rellenado del HAFV	1	33
36	Tendido de tuberías	1	32
37	Colocación del equipo de medición y control	1	36
38	Acometida eléctrica	1	37
39	Construcción y colocación de marcos y contramarcos	1	30
40	Siembra de plantas	1	35
41	Colocación de la tubería de alimentación	1	40
	Puesta en marcha	9	
42	Supervisión del equipo	1	28,29,41
43	Chequeo general	1	42
44	Pruebas de arranque	2	42,43
45	Arranque y estabilización	4	44
46	Toma de las primeras muestras	1	45
	Terminación del Proyecto	94	45,46

En las gráficas 4.1 y 4.2 se muestran estas actividades en forma cronológica, las actividades se encuentran divididas en dos gráficas con el fin de facilitar su manejo. En la primera, se muestran únicamente las primeras 22 actividades que corresponden a las realizadas en términos de análisis, planeación y diseño, mientras que en la segunda se grafican las relacionadas con la construcción misma del sistema.

Gráfica 4.4. Programa de avance para de las actividades previas a la construcción del HAFV

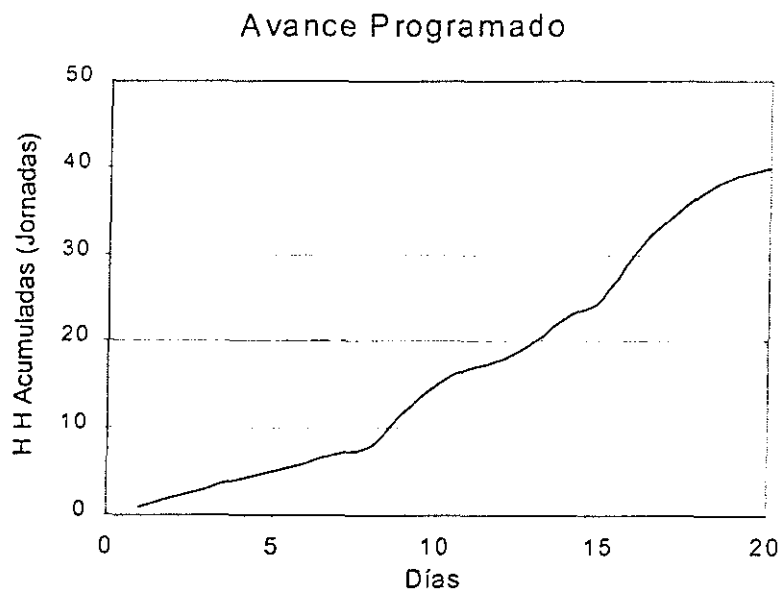
ACTIVIDAD	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
1	X			
2	X			
3	X X X	X X X		
4		X		
5		X		
6		X		
7			X X X	
8			X X	
9			X X	X
10				X X
11				X X
12		X X		
13		X X	X	
14			X	
15			X	
16				X X
17				X
18				X X X
19				X
20				X
21				X
22				X

Es importante señalar que los valores de tiempo que aquí se han estado expresando corresponden a días de trabajo, considerando estos como jornadas de tiempo completo para tres trabajadores. Esto se debe a que, como las actividades se planea que sean realizadas por trabajadores de la Ciudad Universitaria, dependientes de la DGOySG, esto facilitará el manejo de la información.

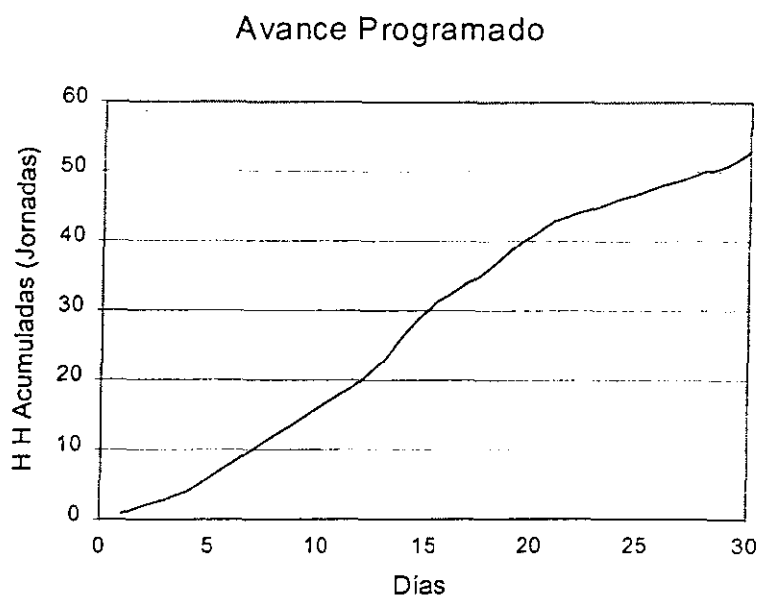
Gráfica 4.5. Programa de avance para las actividades de construcción del HAFV

ACTIVIDAD	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
23	X X X X X					
24		X				
25		X X X				
26			X			
27			X X X X X	X X X X		
28	X	X X				
29		X X X				
30			X X X X			
31			X			
32			X			
33			X			
34			X X	X X X		
35				X		
36				X		
37				X		
38					X	
39					X	
40					X	
41					X	
42					X	
43					X	
44					X	X
45						X X X X
46						X

Esto puede apreciarse también en las gráficas 4.6 y 4.7 en las que puede observarse el avance acumulado esperado para cada una de las actividades, tanto el correspondiente a la conceptualización, planeación y diseño; como para las propiamente ejecutivas de construcción del mismo. En dichas gráficas, al igual que en las anteriores, los valores de tiempo acumulado no se expresan en horas-hombre, sino en jornadas diarias acumuladas. Esto se debe a que, calcularlo de este modo, facilita el manejo de la información haciéndola congruente con el método de estimación utilizado.



Gráfica 4.6. Diagrama de la programación de avance de las actividades previas a la construcción del HAFV



Gráfica 4.7. Diagrama de la programación de avance para las actividades de construcción del HAFV

5. CRITERIOS FUNDAMENTALES DE DISEÑO

En este capítulo, una vez que se ha definido el interés por el desarrollo del diseño con base en las ventajas que presenta la construcción del mismo, se describen las características generales de los equipos involucrados en el arreglo general del tren de tratamiento piloto que se desarrolla en este documento. En este sentido se presentan los criterios básicos de diseño tanto del tren de *tratamiento en su conjunto como de cada uno de los equipos relacionados con éste.*

De este modo, en este capítulo se presentan los criterios básicos de diseño, tanto del tren de tratamiento en su conjunto como de cada uno de los equipos relacionados con éste. Se muestran también algunos parámetros útiles para el dimensionamiento de los equipos y para los balances de materia. Estas bases de diseño se conformaron a partir de los puntos que se listan a continuación:

- Objetivos particulares
- Capacidad trabajo
- Ubicación de la planta
- Características del influente y del efluente
- Requerimiento y disponibilidad de servicios auxiliares
- Disposición y eliminación de desechos
- Condiciones climatológicas
- Normatividad y restricciones

Teniendo en mente que uno de los objetivos principales de este proyecto es la construcción de un proceso a nivel experimental que permita evaluar con mayor precisión las características y variables que definen el comportamiento de un humedal artificial de flujo vertical de dimensiones reales, el sistema propuesto dará tratamiento al agua residual generada en las oficinas de la DGOySG aledañas al tren de tratamiento, produciendo agua con calidad para riego, para ser utilizada por el personal de los mismos talleres de conservación de áreas verdes de la zona cultural de la Ciudad Universitaria, como una alternativa para el humedecimiento de las pilas de

composta que se trabajan en estas mismas instalaciones o par el riego de las áreas verdes aledañas a este edificio.

5.1. Tipo de proceso

El sistema se encuentra conformado por un humedal artificial de flujo vertical, el cual basa su funcionamiento en un proceso de tratamiento biológico, degradando los contaminantes orgánicos presentes en el agua a través de la combinación de procesos aerobios, anaerobios y microaerobios, fenómeno que se presenta gracias a la existencia de diversos tipos de microorganismos dentro del lecho del sistema y a los fotoperíodos que diariamente ocurren.

El proceso consiste de cuatro etapas básicas. (Ver diagrama de flujo de proceso Diagrama I):

- a) Fosa séptica
- b) Tanque sedimentador y homogeneizador de corrientes
- c) Humedal artificial de flujo vertical
- d) Sistema de captación y almacenamiento de agua tratada (Opcional)
- e) Disposición de los lodos generados

5.2. Capacidad

Como ya se mencionó anteriormente, el HAFV fue diseñado con fines experimentales aún cuando se obtenga un beneficio inmediato por la operación del mismo. Por tal motivo, los criterios que se utilizaron para el dimensionamiento fueron principalmente dos: Construir un sistema cuyas características de diseño permitan que sea estudiado fácilmente, utilizar la cantidad de agua residual promedio semanal que se genera regularmente en el área y usarla para humedecer las pilas de composta o para regar y la consideración del área efectiva asignada para la construcción del humedal.

Por lo tanto, con base en los criterios anteriores, el sistema tendrá las capacidades de operación que se muestran en la Tabla 5.1. Los detalles de cálculo de este gasto pueden verse en la memoria de cálculo, en el anexo al final de este documento.

Tabla 5.1 Capacidad de trabajo del HAFV

	Gasto (L/día)
Capacidad de diseño	600
Capacidad normal	650
Capacidad máxima	850
Capacidad mínima	400

5.3. Alimentación

El inmueble del cual serán tomadas las corrientes de agua residual está formado principalmente por oficinas administrativas, donde prestan servicio 72 personas diariamente, de las que se estima que 55 son hombres y el resto, 17, son mujeres.

En estas instalaciones se cuenta con dos áreas de baños que utiliza diferentes zonas de descarga y cada una utiliza una fosa séptica distinta, que se sitúan en los dos costados opuestos del edificio. La primera recibe únicamente los flujos provenientes de los baños de caballeros, cocina y pasillos y la segunda recibe la descarga del baño de damas.

A continuación (Tabla 5.2) se muestra una tabla donde se listan los muebles de baño en uso en las instalaciones.

Tabla 5.2. Muebles de baño en uso en las instalaciones

Muebles	Baño de damas	Baños de caballeros	Cocina y pasillos	Total
Tarjas			4	4
Lavamanos	1	3	1	5
Regaderas	1	8		9
Excusados	2	5		7
Mingitorios		5		5

En función de lo anterior y que una persona produce entre 150 y 200 litros diarios de agua residual pero en este caso se considera únicamente el 50% de este consumo, se estima que el

volumen diario que se descarga en la primera zona es de alrededor de 4,800 litros y 1400 litros en la segunda zona. Por este motivo, para dar tratamiento a toda el agua producida en el inmueble deben construirse dos áreas de tratamiento, una para cada zona de descarga pero es importante destacar que dada el área que fue asignada para la construcción del sistema y la ubicación de la misma solo puede ser posible tratar una fracción de uno de los efluentes, el correspondiente a la descarga de los baños de caballeros, cocina y pasillos.

Debido a las actividades que realiza el personal en este edificio, las características del agua residual generada son sumamente parecidas a las del agua residual doméstica típica. Las características fisicoquímicas, promedio de la mezcla de ambas corrientes, provenientes del edificio de los talleres de conservación, del agua residual que tratará en el sistema, se muestran en la Tabla 5.3. Estos valores fueron obtenidos de las mediciones realizadas a muestras tomadas en el área de descarga.

Tabla 5.3. Valores fisicoquímicos ponderados para el agua residual en estudio

Parámetro	Abreviatura	Intervalo	Unidades
Demanda química de oxígeno	DQO	300 – 500	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	150 – 400	mg/L
$-\log [H^+]$	pH	6.5 – 8.0	Unidades de pH
Sólidos sedimentables	Sse	1 – 2	mL/L
Sólidos totales	STT	600 – 800	mg/L
Nitrógeno amoniacal	NH ₃ – N	2.5-7.0	mg/L
Nitrógeno total	N _{TOT}	27-36	mg/L
Fósforo total	P _{TOT}	2.5-5.3	mg/L

5.4. Efluente

Los valores fisicoquímicos esperados para el agua tratada se muestran en la Tabla 5.4. Un agua con estas características es adecuada para ser utilizada como agua para riego de jardines (NOM-003-ECOL-1998) o para humedecer las pilas de composta.

Tabla 5.4. Valores fisicoquímicos que se desean obtener en el efluente

Parámetro	Abreviatura	Intervalo	Unidades	% Remoción esperado
Demanda química de oxígeno	DQO	20 – 30	mg/L	93-94
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	10 – 20	mg/L	93-95
-log [H ⁺]	pH	6.5 – 8.0	Unidades de pH	--
Sólidos sedimentables	Sse	0.2 – 0.5	mL/L	75-80
Sólidos totales	STT	70 – 100	mg/L	87-88
Nitrógeno amoniacal	NH ₃ – N	2.5 - 6.8	mg/L	0-5
Nitrógeno total	N _{TOT}	8-14	mg/L	60-70
Fósforo total	P _{TOT}	0-2	mg/L	65-95

5.5. Normatividad

Los parámetros que definen las características del agua tratada así como los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales de origen urbano o municipal para ser utilizados para riego se encuentran descritos en la norma oficial NOM-003-ECOL-1997. Estos valores se encuentran listados en el anexo, al final de este documento.

5.6 Requerimiento de servicios auxiliares

5.6.1 Energía eléctrica

Para la operación de la bomba de alimentación del HAFV se requiere una instalación eléctrica con las características que se muestran en la Tabla 5.5. La fuente de suministro para dicha instalación será tomada de la ya existente en las instalaciones de los talleres de conservación.

Tabla 5.5 Requerimientos para la acometida eléctrica

Característica	Parámetro
Tensión	125 V
Núm. de fases	2
Frecuencia	50/60 Hz

5.6.2 Alimentación de agua potable

Para el arranque y estabilización del HAFV es deseable contar con agua potable para regar el lecho y alimentarlo con proporciones cada vez mayores de agua residual para facilitar la adaptación de las plantas. Es importante destacar que, por tratarse de un sistema experimental, se debe contar con una línea de agua potable que permita modificar las características fisicoquímicas de la alimentación, con el fin de evaluar las diferentes capacidades de respuestas que pudiera tener el sistema. Contar con agua potable es importante también para utilizarla durante los periodos de limpieza y mantenimiento.

5.7 Localización de la planta

Una vista aérea de la localización del sistema de tratamiento se muestra en la Figura 5.1, la cual permite observar su ubicación a un costado del edificio de los Talleres de Conservación de Áreas Verdes y Jardines de la Zona Cultural, en la Ciudad Universitaria.

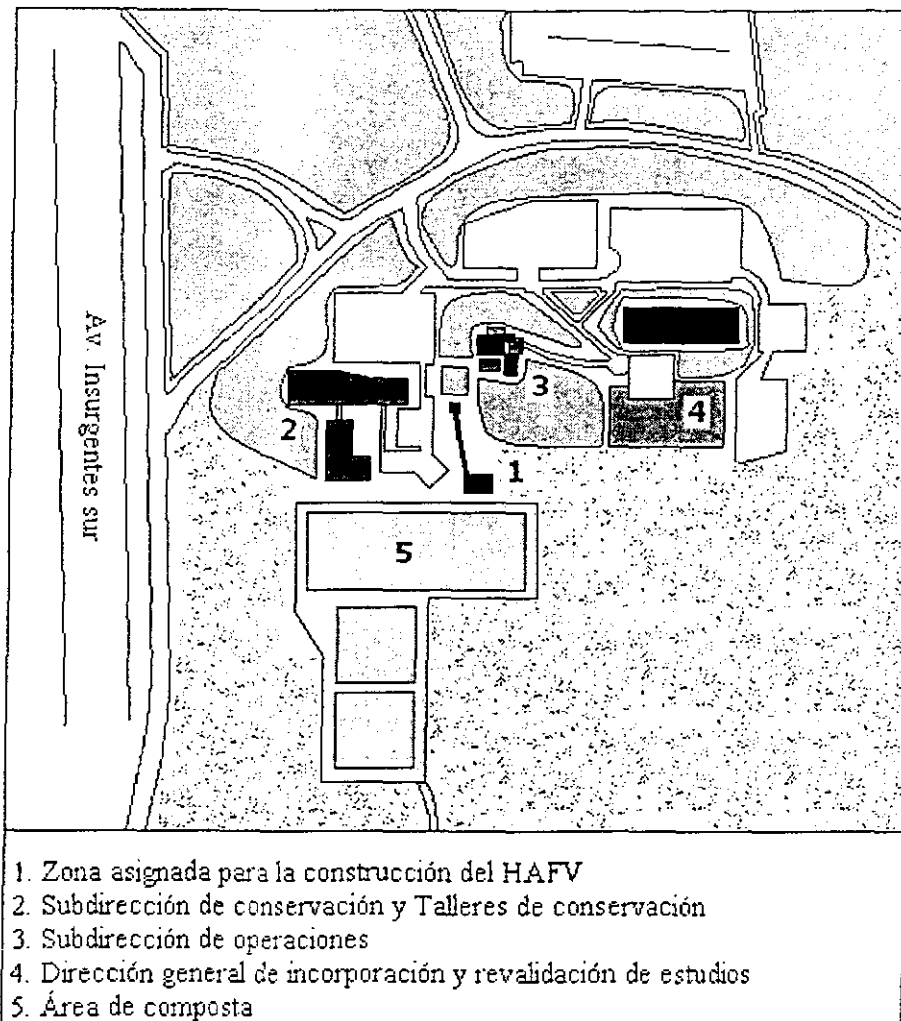


Figura 5.1. Vista aérea del lugar donde se ubicará el HAFV

5.8. Condiciones climatológicas

Los datos que a continuación se presentan fueron tomados del sistema "SIMBAD" del INEGI (www.inegi.gob.mx) y son correspondientes a los registrados durante el año de 1997. Estos datos son promediados para todo el Distrito Federal y constituyen una aproximación a las condiciones de la zona de interés. Siendo que estas características se modifican en las diferentes zonas del Distrito Federal, es recomendable que, para realizar estudios más detallados, sean evaluadas estas condiciones directamente en este lugar (*in situ*).

5.8.1. Temperatura

En la Tabla 5.6, que se muestra a continuación, se presentan los valores de temperatura registrados durante el año de 1997. Este parámetro es importante ya que influye directamente en las características de evapotranspiración en el HAFV así como en las condiciones operativas del mismo, puesto que tanto el crecimiento de la vegetación y la cinética de degradación de contaminantes están directamente relacionadas con las condiciones climatológicas en general (www.inegi.gob.mx).

Tabla 5.6 Temperaturas registradas durante el año de 1997

Intervalo	Temperatura (°C)
Máxima	23
Mínima	6
Máxima promedio	23
Promedio del mes más caliente	17.5
Promedio del mes más frío	12.5
Promedio	16.3

5.8.2 Precipitación pluvial

Éste es otro parámetro importante que debe ser considerado tanto durante el diseño como durante el seguimiento de la operación del tren de tratamiento debido a que es altamente probable que durante los meses de mayor precipitación pluvial se presenta un efecto de dilución de contaminantes tanto en el influente como en el mismo efluente (Millan-Hernández, 1999). De manera adicional, puede ocurrir un aumento considerable en la presencia de sólidos sedimentables, producto del arrastre de tierra y arcilla de los alrededores hacia el interior del humedal, lo que repercutiría en un aumento en las actividades de mantenimiento del sedimentados primario o, en su defecto, en un incremento en el azolvamiento del lecho del humedal.

Tabla 5.7 Valores de precipitación pluvial registrados mensualmente durante el año de 1997 (www.inegi.gob.mx).

Mes/ Año	Precipitación pluvial expresada en mm
enero, 1997	1.3
febrero, 1997	1.7
marzo, 1997	27.5
abril, 1997	57.2
mayo, 1997	63.0
junio, 1997	84.3
julio, 1997	204.9
agosto, 1997	139.4
septiembre, 1997	114.6
octubre, 1997	52.7
noviembre, 1997	15.4
diciembre, 1997	12.1
Total del año	774.1

5.8.3 Humedad relativa y presión atmosférica

Estos dos últimos parámetros son importantes de tomarse en cuenta para realizar los respectivos balances de materia involucrados con el diseño del HAFV ya que determinan también los valores de evapotranspiración del sistema de tratamiento.

Tabla 5.8 Valores de la humedad relativa registrada durante el año de 1997 (www.inegi.gob.mx).

media	62 %
mínima	49 %
máxima	100 %

Presión atmosférica

583 mm Hg

5.9. Descripción general del equipo

A continuación se presenta una análisis de las características generales con las que debe contar cada uno de los equipos del tren de tratamiento y que deben ser tomadas en cuenta para el diseño de los mismos. Estas características se definen básicamente en función de los requerimientos operativos del tren de tratamiento para lograr cumplir de la manera más adecuada con el objetivo con el que se proyectó la construcción de dicho tren de tratamiento.

5.9.1. Fosa séptica

En la zona de donde serán tomadas las corrientes para alimentar al sistema, se encuentra ya construida una fosa séptica que se alimenta con la corriente proveniente de los excusados y la cocina del edificio. Con este equipo se retiran una gran cantidad de sólidos, tanto sedimentables como sobrenadantes, además de que el agua recibe un tratamiento biológico de tipo anaerobio que logra una remoción de entre 10 y 25% de materia orgánica, medida como DBO_5 .

En Figura 5.2 se muestran las características básicas de esta fosa séptica, la cual tiene un volumen total de trabajo de aproximadamente 20 m^3 , con un tiempo de residencia de entre 2 y 6 días.

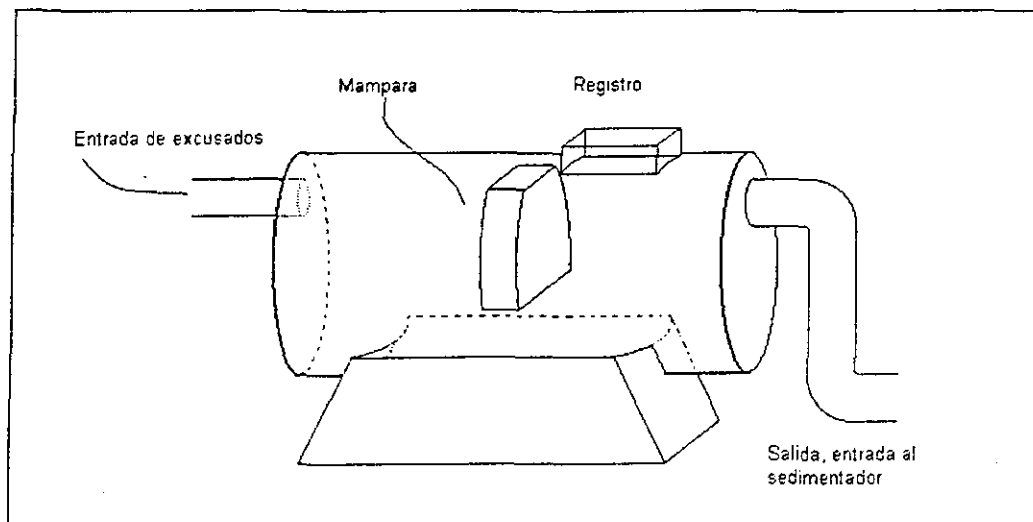


Figura 5.2 Esquema simplificado de la fosa séptica

5.9.2 Tanque homogeneizador-sedimentador

Se propone la instalación de un tanque homogeneizador-sedimentador con el propósito de mezclar la corriente de salida de la fosa séptica y la proveniente de las regaderas. En él, también se retiran aproximadamente el 60% de los sólidos totales. De este tanque será bombeada el agua para la alimentación del HAFV. El tanque sedimentador, cuyo esquema básico podría ser el que se muestra en la Figura 5.3, será construido a partir de un tinaco comercial de material plástico, con capacidad de entre 2000 y 2500 litros. Este tanque debe contar con una altura mínima de 1.30 m para lograr la correcta sedimentación de los lodos y con una mampara plástica, que separe físicamente la entrada de la salida del mismo, con el objeto de contener las natas sobrenadantes y así evitar que sean bombeadas al sistema, evitando que se provoque su rápido azolvamiento u oclusión.

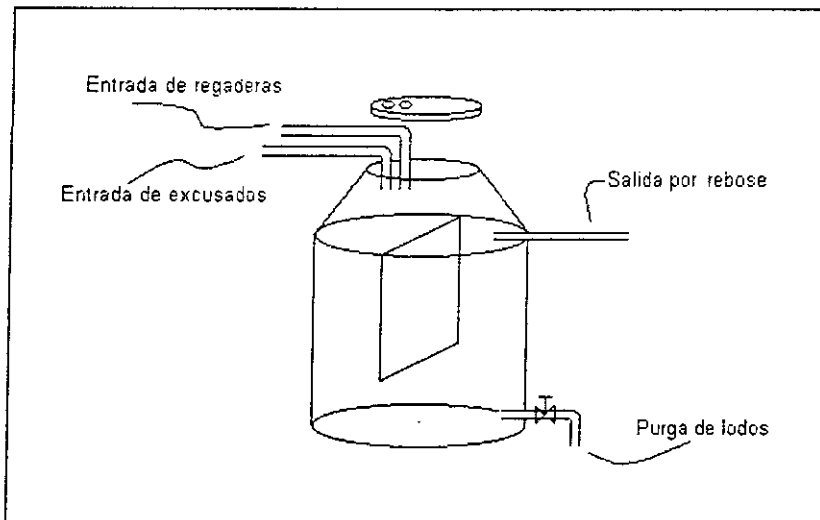


Figura 5.3 Esquema simplificado del tanque homogeneizador-sedimentador

5.9.3 Bomba

Aunque de manera ideal, con una asignación adecuada de las áreas de construcción de cada uno de los equipos involucrados con el tren de tratamiento, podría prescindirse de un sistema de bombeo para la alimentación del humedal, dadas las circunstancias en las que se encuentra dispuesto el terreno, es necesaria la instalación de una bomba para hacer llegar el agua colectada en el tanque homogeneizador- sedimentador al HAFV el cual se ubicará aproximadamente a 65m de distancia de este tanque y una diferencia de altura de aproximadamente 3.5m. En este sentido se recomienda el uso de una bomba convencional monofásica con capacidad de entre 0.25 y 0.5 HP, pero con un impulsor de canal abierto para evitar que éste se dañe por la posible presencia de sólidos presentes en el agua. El bombeo será controlado por un controlador temporal intermitente conocido comúnmente como “*timer*” que permita hacer cuatro dosificaciones diarias de agua con periodos regulares.

5.9.4 Humedal artificial de flujo vertical

Las dimensiones generales de este sistema son definidas en función de parámetros como: La carga orgánica (medida como DBO₅ y DQO) la, presencia de nitrógeno y fósforo, el tiempo de residencia hidráulico (TRH) y la razón de carga hidráulica (RCH). A partir de estos parámetros y de las condiciones de descarga esperadas, se diseñó un HAFV con las siguientes características básicas:

largo:	6 m
ancho	2.5 m
profundidad	1.3 m

Como ya se menciono anteriormente, el HAFV será alimentado en periodos de 6 horas, es decir cuatro alimentaciones diarias. El agua se introducirá al sistema por cuatro salidas colocadas de manera equidistante una de la otra y será colectada por un tubo perforado colocado en el fondo del mismo, como se muestra en la Figura 5.4. El HAFV contará también con una zona de rebose,

dentro de la cual es posible controlar el nivel de inundación del lecho del sistema utilizando una manguera flexible.

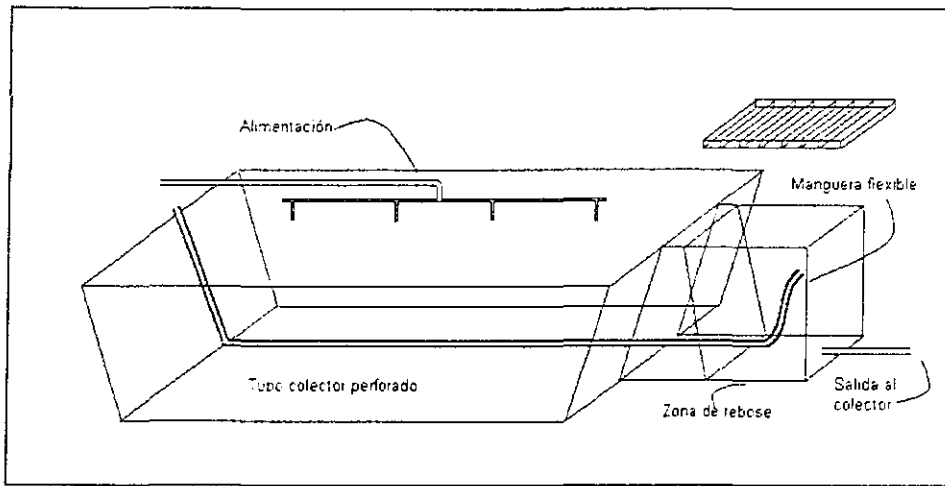


Figura 5.4 Esquema simplificado del HAFV

5.9.5 Tanque colector

Para la captación del agua tratada por el sistema, se utilizará un tanque plástico con capacidad de 2,000 litros, que permita el almacenamiento del agua tratada por periodos de hasta tres días. para contener el agua generada durante los fines de semana y para facilitar el manejo de la misma. Como se muestra en la Figura 5.5, el tanque tendrá un controlador de nivel por flotación para evitar el derramamiento del agua tratada. En el caso de que se exceda la capacidad del tanque, la zona de rebalse tiene la capacidad de contener hasta 500 litros más de agua. El agua contenida en este tanque podrá ser empleada para el riego de las pilas de composta.

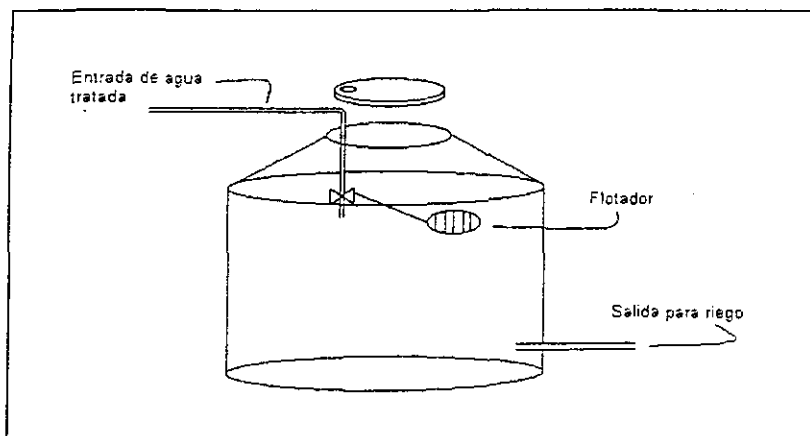


Figura 5.5. Esquema simplificado del tanque colector

5.10 Lista de materiales y equipo

A continuación se presenta la Tabla 5.9, con la lista de materiales y equipo necesario para la construcción del HAFV piloto dentro de las instalaciones de la Ciudad Universitaria.

Tabla 5.9. Lista de materiales y equipo

DESCRIPCIÓN	Cantidad
Geomembrana PPE 32 mil reforzado color gris/negro, marca <i>Watersaver</i>	50 m ²
Tanque plástico de 2000 litros	2 pzas
Electrobomba autocebante " <i>Barnes Barmesa</i> " de 1/2 HP 13400L.P.H. (modelo SP5)	1 pza
Medidor de flujo de chorro múltiple de 1 pulg	1 pza
Válvula <i>Check</i> de 1 ½ pulg	1 pza
Válvula de paso de 1 ½ pulg	3 pzas
Válvula de ½ pulg	1 pza
Cople conector macho PVC 1 ½ pulg	2 pzas
Tubería de 3 pulg de PVC	9 m
Manguera flexible de 2 pulg	1.5 m
Codo de 90° de 3 pulg	5 pzas
Tubería de 1 ½ pulg de PVC	75 m
Tubería de 1 pulg de PVC	7 m
Reducción de 1 ½ a 1 pulg de PVC	1 pza
Te de 1 pulg de PVC	2 pzas
Codo de 1 pulg	3 pzas
Cople-uni3n 1 ½ pulg	15 pza
Caja enrejada para la protecci3n de la bomba	1 pza
Reducci3n 6 pulg – 3 pulg PVC	2 pza
Pegamento de PVC 250 mL	2 pza
Tapa y contramarco con bisagra para registro de 50 cm x 50 cm	1 pza
Tapa enrejada y contramarco para registro de 1m x 1m	1 pza
Cemento	15 bultos
Arena	½ m ³
Granz3n	½ m ³
Grava de ¾ pulg.	½ m ³
Tabique rojo	½ millar

Tabla 4.9. (Continuación) Lista de materiales y equipo

DESCRIPCIÓN	Cantidad
Escoria volcánica tamizada de 0.5 – 4 mm	10 m ³
Escoria volcánica tamizada de 4 – 8 mm	6.5 m ³
Escoria volcánica tamizada de 8 – 12 mm	2 m ³
Escoria volcánica en roca	3 m ³
Cable calibre 10	1 rollo
Interruptor de tijera para fase y neutro	1 pza
Fusibles	4 pzas
Timer para arranque y paro 24V	1 pza
Relé activado por bobina 24V	2 pzas
Transformador 115VAC-24VCC	1 pza
Relé activado por flotador	1 pza
Caja enrejada para la protección del equipo de control	1 pza

5.11. Hojas de datos

En las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se muestran las hojas con las características básicas del medidor de flujo, la bomba y la geomembrana, respectivamente. Las características que se listan en estos documentos fueron tomadas de los datos obtenidos de los diferentes proveedores que fueron evaluados, seleccionando aquéllos que cumplieran de manera más adecuada con las necesidades del tren de tratamiento.

Parte importante de los acuerdos que se lograron con las autoridades de la DGOySG fue que, en la medida de lo posible, se podría contar con materiales existentes en las bodegas de esta misma dependencia, tales como tubería y accesorios de PVC y cobre, alambre de alta tensión, material de construcción como varilla, cemento, tabique etc; tanques colectores, malla para enrejado, conectores e interruptores entre otros. Esto significa que se podría contar con casi todo el material requerido, mismo que se muestra en la lista de materiales, páginas atrás, por lo que para la adquisición real solo se muestran las hojas de datos de los equipos que será necesario para completar dicha lista.

KENT

HOJA DE DATOS PARA EL MEDIDOR DE FLUJO

TIPO: Chorro múltiple	CUERPO: Bronce	TEP. MÁX: 25° C
PRESIÓN MÁX. DE TRABAJO: 10 kgf/cm²		CAUDAL MÁX: 400 LPH
LONGITUD: 190 mm	ALTURA: 165 mm	PESO: 1.35 kg.
TIPO DE TUBERÍA: Cilíndrica, llena 100%		
Diámetro nominal de la tubería: 1"		MATERIAL de TUBERÍA: Cobre
TIPO DE FLUJO: Agua residual		SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN: 5%
FLUJO POR: Bombeo		NIVEL MIN. DE FLUJO: ¼ de la altura total

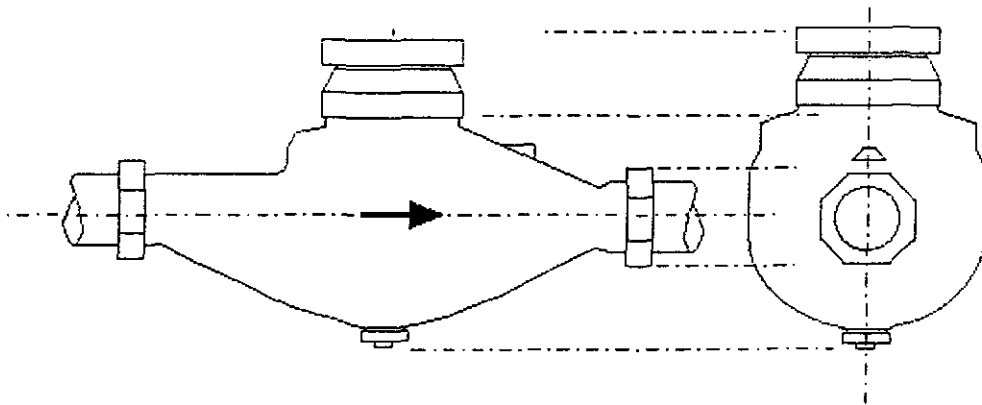


Figura 5.6. Hoja de datos para el medidor de flujo, tomado de los datos proporcionados por el proveedor

BARNES BARMESA S.A de C.V.

EQUIPOS DE BOMBEO

HOJA DE DATOS PARA LA BOMBA

TIPO: Electrobomba Autocebante		MODELO: S P-5
TIPO DE AGUA: Residual y de drenaje		CAPACIDAD: 1.34m³/h (354 G.P.H)
UNIDAD MOTRIZ: Eléctrica	NÚM. DE FASES: 1	VOLTAJE: 115/220 Volts
RPM: 3450	POTENCIA: ½ HP	CICLOS: 60
PRESIÓN DE SUCCIÓN: --		PRESIÓN DE DESCARGA: --
TAMAÑO DE PARTÍCULAS: --		PORCENTAJE DE SÓLIDOS: 5 - 25 %
TIPO DE IMPULSOR: Semiabierto		DIÁMETRO DE IMPULSOR: 12.7 cm
PROTECCIÓN TÉRMICA: Capacitor de ½ H.P		
N.P.S.H DISPONIBLE: Positivo		N.P.S.H. REQUERIDO: --
TIPO DE OPERACIÓN. Arranque/paro		MEDIO DE TRABAJO: Seco
LONGITUD: 508 mm	ALTURA. 295 mm	ANCHO: 285 mm
PESO: 27 kg	DN SUCCIÓN: 1 ½ "	DN DESCARGA: 1 ½ "

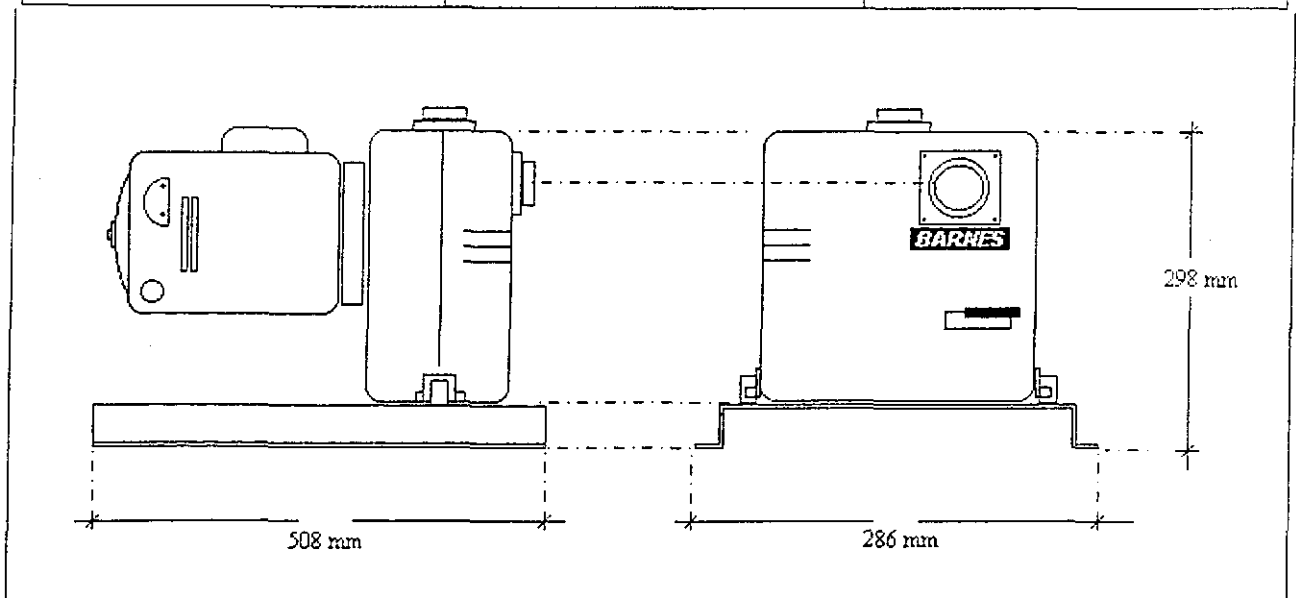


Figura 5.7. Hoja de datos para la bomba, tomada de los datos proporcionados por el proveedor (DN=1 ½ , RPM= 3450, POTENCIA= ½ HP)

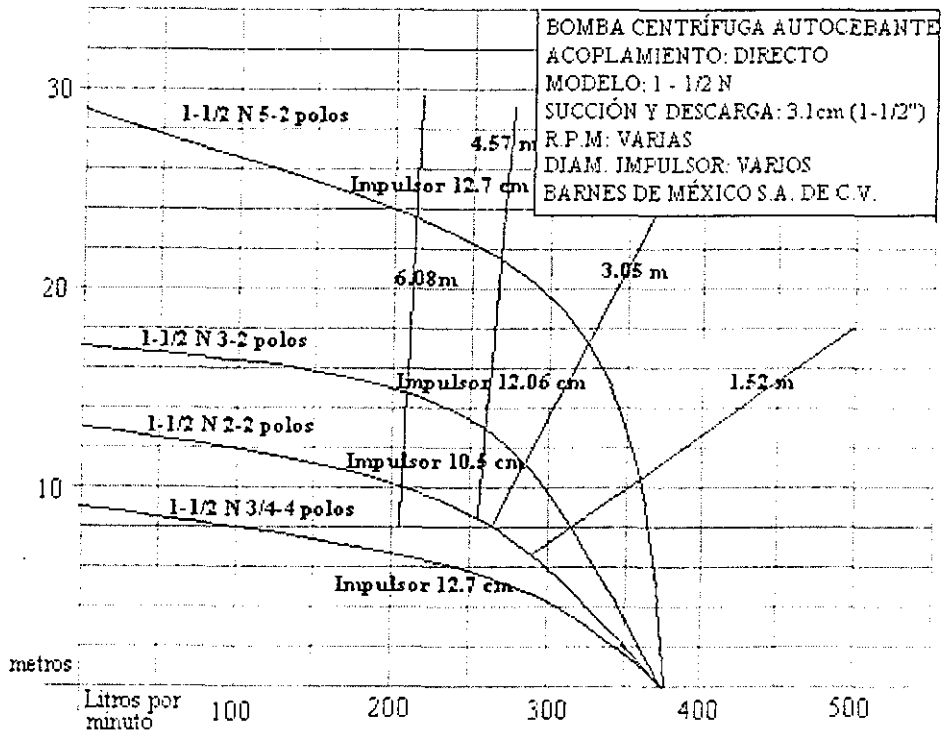


Figura 5.7. (Continuación) Hoja de datos para la bomba, tomada de los datos proporcionados por el proveedor.

5.12 Diagrama de flujo de proceso

A continuación se muestra el diagrama básico del ordenamiento que tendrán los equipos en el tren de tratamiento. En este se muestran indicados cada uno de los equipos y numeradas cada una de las corrientes, inmediatamente se muestra también una tabla donde se indican las características más relevantes de estas corrientes.

CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8
FLUJO (L/día)	2400	3000	2400	650	5	4700	650	650
DBO ₅ (mg/L)	980	80	787	320	----	320	15	15
STT (mg/L)	1400	20	650	140	5000	140	70	70

Tabla 5.10. Balance de materia por cada corriente de proceso

WATERSAVER PPE
ENGINEERING ESPECIFICATION GUIDE

.032 PPE 3200 S

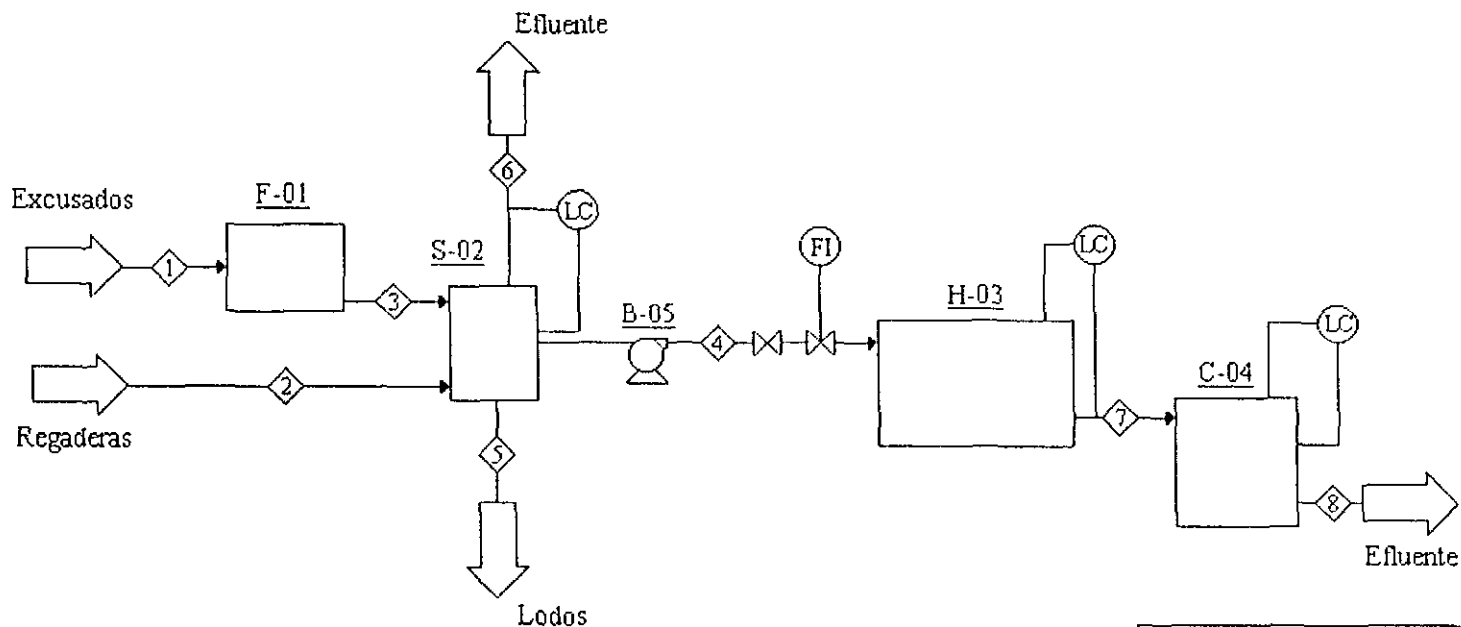
Reinforced Gray/Black Polypropylene
 10 x 10 1000 denier polyester scrim reinforced



PROPERTY	TEST METHOD	TYPICAL VALUE
Gauge, nominal (mils)		32.0
Plies, Reinforcing		1
Thickness, Minimum (mils)	ASTM D-751 Optical Method	29.0
Breaking Strength-Fabric (lbf)	ASTM D-751 Method A	225
Elongation, Minimum (%)	ASTM D-751 Method A	15
Low Temperature (°F)	ASTM D-2136, 1/8" Mandrel, 4 hrs. Pass.	-40
Tear Resistance, Minimum (lbf)	ASTM D-751, Method G NSF Modified	55
Puncture Resistance, Minimum (lbf)	FTMS 101 C, Method 2031	210
Dimensional Stability		
Hydrostatic Resistance, Minimum (psi)	ASTM D-751, Method A Procedure 1	350
Ply Adhesion, Minimum (lb/in)	ASTM D-413 Machine Method Mod.	20
UV Resistance	ASTM G-26 Xenon Arc @ 80° C	Pass 4000 hrs
Env. Stress Crack Resistance Minimum (hrs w/o failure)	ASTM D-1693 3000 hrs	Unaffected by ESCR

This specification covers a reinforced thermoplastic olefin elastomer sheet, intended for use as a lining for the safe containment of liquid and solid waste. This lining will provide service in many applications where a thicker material is not required or where a scrim reinforced material with higher resistance to deformation and/or better conformability in elongation is important. This product is designed with a gray/black color. The gray color is designer for maximum UV resistance an must be installed with the GREY SIDE UP:

Figura 5.8. Hoja de datos para la Geomembrana de PPE, tomada de los datos proporcionados por el proveedor



LISTA DE EQUIPO	
CLAVE	NOMBRE
F-01	Fosa Séptica
S-02	Sedimentador
H-03	Humedal
C-04	Cisterna
B-05	Bomba

HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PIQAYQA

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN

Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello.

19 de marzo de 1999

DIAGRAMA I

6 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL EQUIPO Y SU INSTALACIÓN

Como ya se mencionó anteriormente, el objetivo principal para la construcción de este HAFV es el de contar con un equipo con dimensiones de escala piloto que permita obtener datos y parámetros útiles que contribuyan con lograr una correcta adaptación de estos sistemas a las condiciones y características particulares de las diferentes zonas de nuestro país. No obstante, la conceptualización, diseño y construcción del tren de tratamiento propuesto en el presente estudio fueron realizados con el enfoque requerido para la instalación de esta planta piloto en particular. Considerando por lo mismo, el tipo de descargas de aguas residuales en la zona ya descrita, la cual fue asignada para la construcción del tren de tratamiento. Lo anterior se hizo con el fin de simular con la mayor aproximación posible un caso real para que también pudieran ser detectadas como variables importantes los problemas de diseño y construcción que se pudieran ir presentando a lo largo de estos procesos y así enriquecer a todos los niveles el conocimiento en el campo de la construcción de humedales artificiales, principalmente en los de flujo vertical. En el Diagrama I se muestra una vista aérea del arreglo general del tren de tratamiento en la zona asignada para su construcción.

6.1 Fosa séptica

Como ya se mencionó anteriormente, este sistema de tratamiento primario ya se encuentra instalado en la zona y consiste en un tanque con forma cilíndrica construido en asbesto, el cual está colocado en forma horizontal (ver fotografía de la Figura 6.1), con un volumen aproximado de 20 m^3 . En su interior cuenta con un sistema de mamparas que permiten la separación de los sólidos contenidos en el agua residual. Aunque la capacidad de diseño de este equipo, trabajando como único sistema de tratamiento, es inferior a los requerimientos de la alimentación es útil, pues con él se retiran una gran cantidad de los sólidos sedimentables y de las natas sobrenadantes provenientes de dicha línea, además de lograr una remoción de entre 10 y 25% de la materia orgánica, medida como DBO_5 . Este valor corresponde a lo anotado en sus especificaciones y se complementa con el valor obtenido teóricamente en función de la estimación de la carga orgánica promedio de la corriente.

Cómo puede verse en el registro fotográfico, el equipo está en franco deterioro por las condiciones de abandono en que se encuentra y por no recibir el mantenimiento periódico adecuado, lo que da como resultado que no cumpla con la función para la cual fue instalado. De cualquier modo, realizando los cambios adecuados en dicha fosa, puede ser de gran utilidad si se integra al tren de tratamiento propuesto.

La descarga del equipo consta de una brida conectada a un tubo de drenaje convencional construido en concreto de 6 pulgadas de diámetro. Dentro de éste se propone colocar un tramo de tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro, con 20 cm de longitud dentro de la fosa y con un codo de 90° se sumergirá 20 cm. Esto tiene la finalidad de eliminar las natas sobrenadantes de la corriente que posteriormente se alimentara a tanque sedimentador. Tanto los sólidos removidos en la fosa séptica como las natas serán posteriormente degradadas con cal y mezcladas con la composta para garantizar su estabilización y disposición adecuadas.

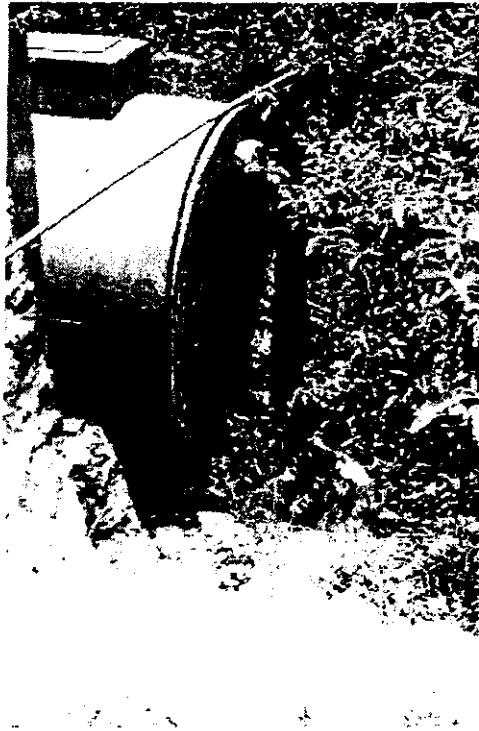


Figura 6.1. Vista lateral de la fosa séptica construida en la zona

6.2 Tanque homogeneizador, sedimentador

Para la correcta colocación del tanque será construido un "muerto" de cimentación (colado de cemento de 2 x 2 m) sobre el cual descansa la estructura del tanque construida en PTR de hierro. Las características del tanque se encuentran descritas en el Diagrama IX. El material de construcción del tanque es PVC, con forma cilíndrica y fondo cónico, que facilita la captación de sólidos sedimentables. La purga de éstos se hace por medio de una sección de tubería de PVC de 2 pulgadas de diámetro, controlada por una válvula de globo y construida con el mismo material. Debido a las características geográficas de la zona, el área asignada para la colocación del tanque se encuentra situada a una distancia aproximada de 11 metros del sedimentador; la entrada de las corrientes se encuentra a 1.1 m por debajo de la descarga de la fosa séptica y 45 cm por debajo de la descara de la línea de regaderas. Esto con el fin de que la conducción de ambas corrientes hacia el tanque sedimentador se haga por la acción de la gravedad.

Para la conexión de la línea proveniente de regaderas, debe hacerse un desvío de la misma, con un cople reductor de 6 a 3 pulgadas. La conducción de ambas corrientes, la de excusados y la de regaderas, hacia el tanque sedimentador se harán con tubería sanitaria de PVC de 3 pulgadas, y deben de estar correctamente cimentadas como se muestra en el diagrama VIII, eso con el fin de evitar la ruptura de las mismas por movimientos telúricos o por acomodamientos del suelo.

La alimentación de estas corrientes dentro del tanque homogeneizador sedimentador se hace por la parte superior con la misma tubería de 3 pulgadas. El flujo de estas corrientes no es constante, debido a que los usuarios no disponen de las instalaciones constantemente. De este modo se tienen horarios para el uso de regaderas y excusados. Por tal motivo, el tanque cuenta con un volumen suficiente para poder amortiguar las variaciones de carga orgánica a lo largo del día y facilitar la sedimentación de sólidos. Para facilitar la remoción de sólidos sedimentables y de natas sobrenadantes, el sedimentador deberá contar con una placa de acrílico de 90 cm de longitud y con una inclinación de aproximadamente 30°, que hará las veces de mampara.

Para evitar el desbordamiento de las aguas del sedimentador, éste tendrá acondicionada una salida para conducir a la grieta en la que actualmente se realiza la descarga de las aguas

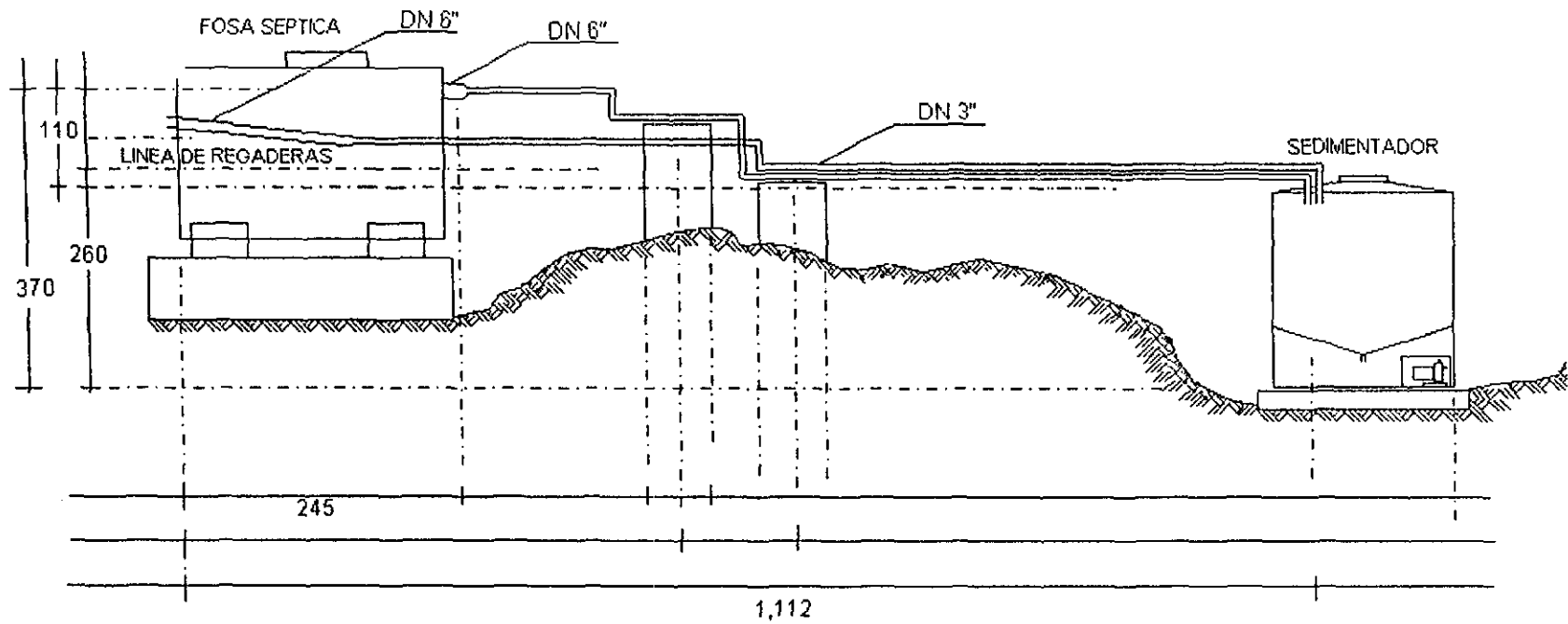
provenientes de la fosa, el excedente de agua que pudiera llegar a tenerse como consecuencia de un aumento en el consumo de agua en las instalaciones durante las horas críticas o por un evento extraordinario. Esta tubería es de PVC y de 1.5 pulgadas de diámetro.

6.3 Sistema de bombeo

Al pie de la estructura de soporte del tanque sedimentador se encontrará colocada la bomba que alimenta al humedal por periodos intermitentes. Como se muestra en el Diagrama IX, la bomba se encuentra protegida por una caja enrejada construida con ángulo de acero y malla ciclónica, soldada a la estructura de soporte del tanque y acoplada al suelo de concreto por medio de tornillos. La succión se hace desde el interior del tanque con un tubo de PVC con diámetro de 1.5 pulgadas, que se encuentra sumergido 1.1 m por debajo de la parte superior del tanque. Del mismo modo, la descarga se hace con tubería con idénticas características a las que tiene la de succión.

La bomba es una electrobomba autocebante marca Barnes Barmesa modelo SP5 con capacidad de $1.34\text{m}^3/\text{h}$ (354 GPH), y motor de $\frac{1}{2}$ HP, con la capacidad de manejar aguas que contengan sólidos de gran tamaño, pues tiene un impulsor de tipo semiabierto, característica que la hace inatascable. El detalle de las características de este equipo pueden verse en las hojas de datos.

El control de arranque y paro de la bomba se hace por medio de un "timer" (controlador de tiempo). Con éste se controlan los volúmenes de alimentación por cada periodo, así como el tiempo que debe existir entre cada periodo de alimentación. Con el fin de proteger la bomba y no trabajar en seco, el sedimentador contará con un sencillo sistema de paro de emergencia activado por un flotador acoplado a un "relé" normalmente cerrado que corta el suministro de energía eléctrica a la bomba cuando el nivel del agua dentro del tanque es menor al mínimo indispensable. El detalle de la conexión del equipo de control eléctrico puede verse en el diagrama de potencia y conexiones (Ackermann y col., 1994; Meixner y Sauer, 1990; Van Valkenburgh y Neville, 1983) que ese encuentra en el Diagrama X.



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO
VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
PIQAYQA

PRETRATAMIENTO: Conexión de la fosa séptica y el sedimentador
Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMON

Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello. 19 de marzo de 1999

DIAGRAMA VIII

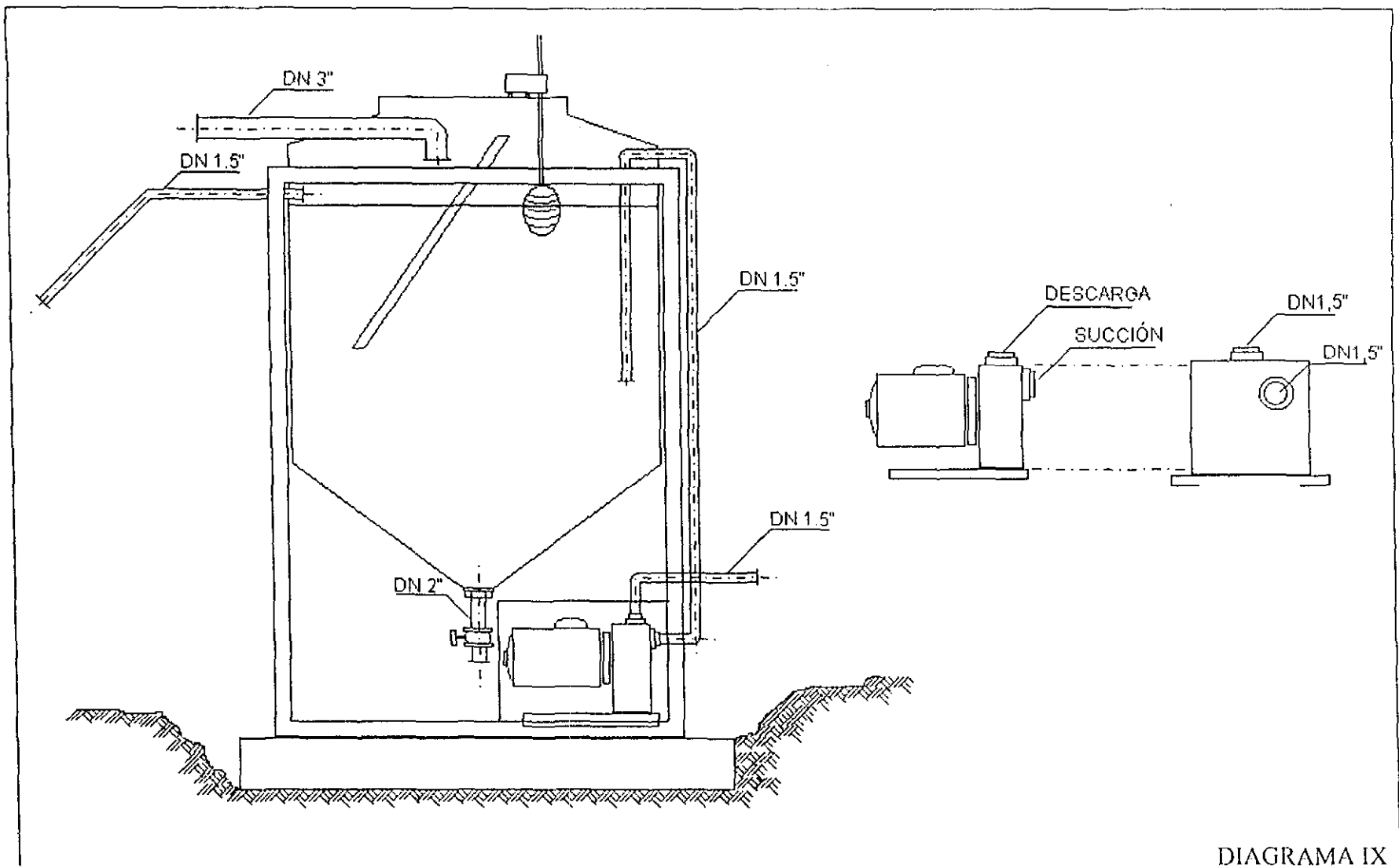
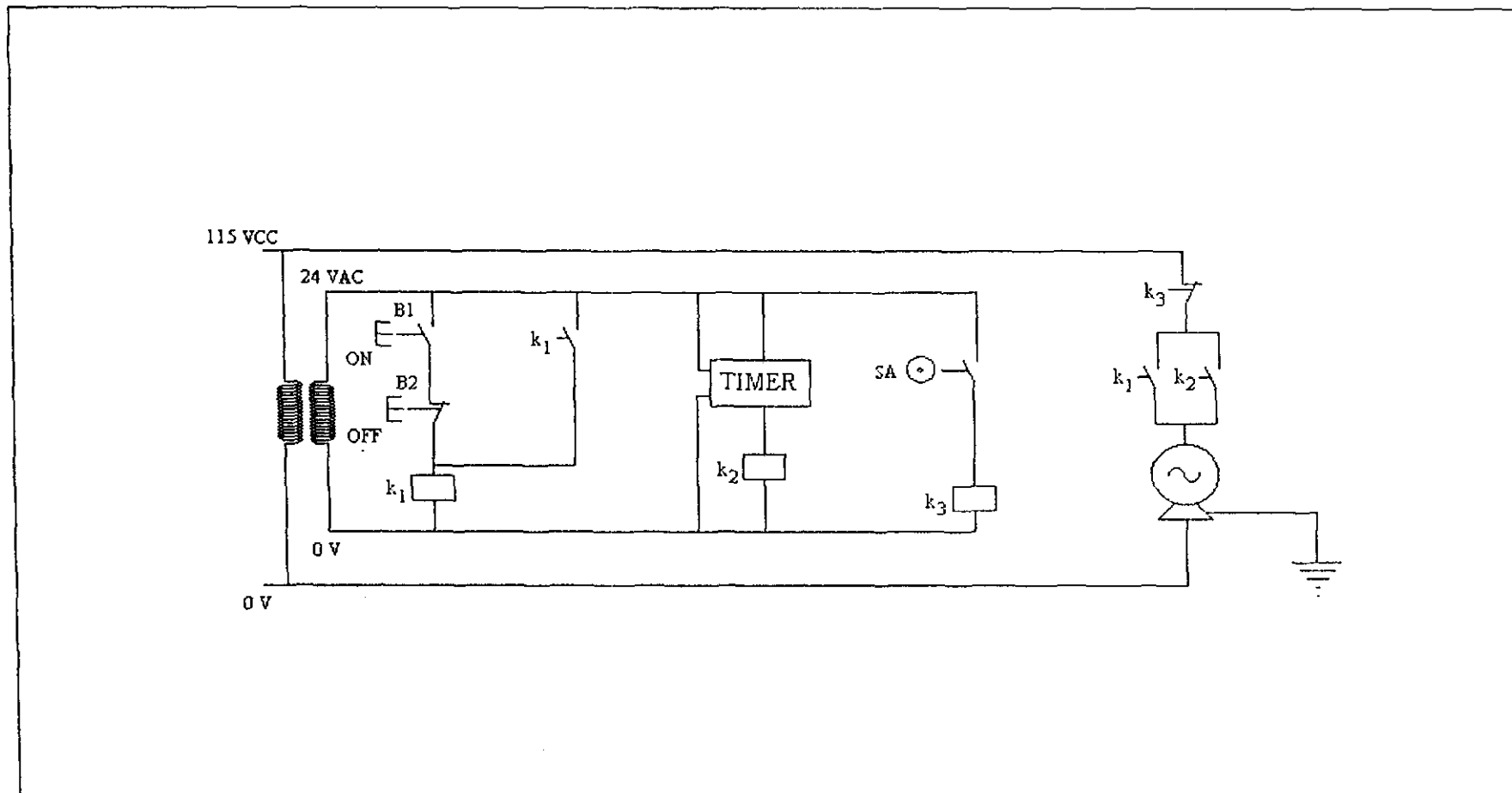


DIAGRAMA IX

<p>HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL</p>	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO PIQAYQA</p>
<p>SEDIMENTADOR: Detalle de la conexión del equipo Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural</p>	<p>Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello. 19 de marzo de 1999</p>



<p>HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL</p>	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO PIQAYQA</p>
<p>DIAGRAMA DE CONEXIONES</p>	<p>Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN</p>
<p>Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural</p>	<p>Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello. 19 de marzo de 1999</p>

DIAGRAMA X

6.4 Humedal artificial de flujo vertical

6.4.1 Excavación

Normalmente, para la construcción de un HA se realiza una excavación de tal modo que la parte superior del humedal quede a nivel de suelo o unos cuantos centímetros arriba. Esto, porque es mucho más barato hacer la excavación que realizar una obra de construcción en material sólido correctamente cimentado e impermeabilizado. Se hizo ya mención de que las características del suelo en el cual será construido el HAFV es material de relleno, lo que facilitó enormemente la excavación; pero, siendo la profundidad necesaria para el humedal de 1.4 m., únicamente es posible excavar hasta los 0.8 o 0.9m, pues a esta profundidad ya se encuentra una gruesa capa de piedra volcánica que impide continuar con la excavación. De este modo y gracias a la suavidad del terreno, se optó por elevar el nivel de la excavación arrastrando y compactando tierra hacia los bordes de la misma hasta lograr la profundidad requerida. Las características de esta excavación peden verse en la fotografía de la Figura 6.2 que se muestra a continuación.

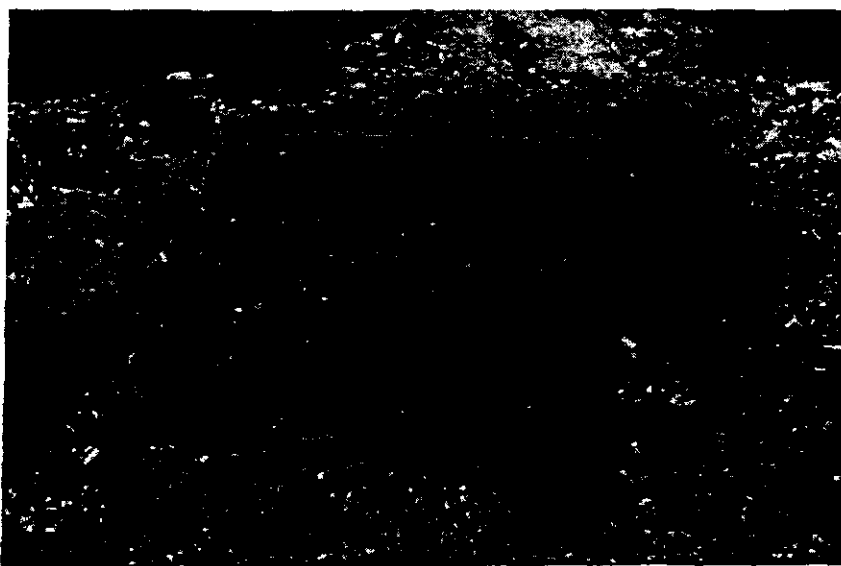


Figura 6.2 Excavación realizada para la construcción del HAFV

6.4.2 Impermeabilización

Es importante destacar que dadas las características del terreno y particularmente del sitio asignado para la construcción del HAFV no se siguieron los pasos recomendados en la bibliografía para la colocación de la geomembrana. En la mayor parte de la bibliografía consultada se recomienda que después de realizada la excavación, se suavicen los bordes y las paredes de la misma utilizando arcilla compactada antes de colocar la geomembrana, esto con el fin de proteger la geomembrana de bordes filosos y evitar que sufra rupturas.

Después de evaluar de las condiciones del sitio, en colaboración con las autoridades de la DGOySG, se hizo evidente que, siendo el terreno muy suave y que por tal motivo tiende constantemente a sufrir asentamientos, era necesario construir una estructura de cemento para contener el lecho del humedal y así evitar la deformación del mismo para que, con el paso del tiempo, la geomembrana no fuera sujeta a tensión o corrugamiento en algún punto y evitar así alguna ruptura. El producto final de esta construcción es un contenedor de cemento colado y aplanado construido directamente sobre la superficie de tierra compactada que, si bien no es *suficientemente flexible para soportar deformaciones, cumple con la función de dar estructura y contención al humedal, aún cuando sus paredes sean quebradizas* (el aspecto de esta construcción puede apreciarse en las Figuras 6.3 y 6.4). Sobre esta construcción debe colocarse la geomembrana, que en este caso en particular se recomienda una geomembrana de polipropileno de 3.2 mm de espesor. Las características particulares de ésta se muestra con detalle en la respectiva hoja de datos que aparece al final del capítulo anterior.

La colocación de la geomembrana se hace anclando los bordes alrededor de la excavación, en una zanja cavada a lo largo de todo el perímetro de ésta de 20 o 25 cm de ancho y 30 cm de profundidad. Este método de anclaje se ilustra en el Diagrama V que se muestra más adelante. La geomembrana se coloca normalmente en forma de pliegos que deben tenderse todo lo largo de la superficie y las paredes del contenedor, estos pliegos deben ir electrosellado unos con otros de modo que *queden perfectamente unidos para evitar infiltraciones.*

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

A la salida del equipo, donde se capta el agua para su recolección la geomembrana debe contar con un cople conector de 6 pulgadas de diámetro. Ésto se hace porque la captación de agua se lleva a cabo por medio de tubería de PVC perforada (las características de esta instalación se explican más adelante) y el PVC y el polipropileno son materiales que no pueden ser termosellados uno con otro.



Figura 4. Vista de las paredes de cemento aplanadas del HAFV

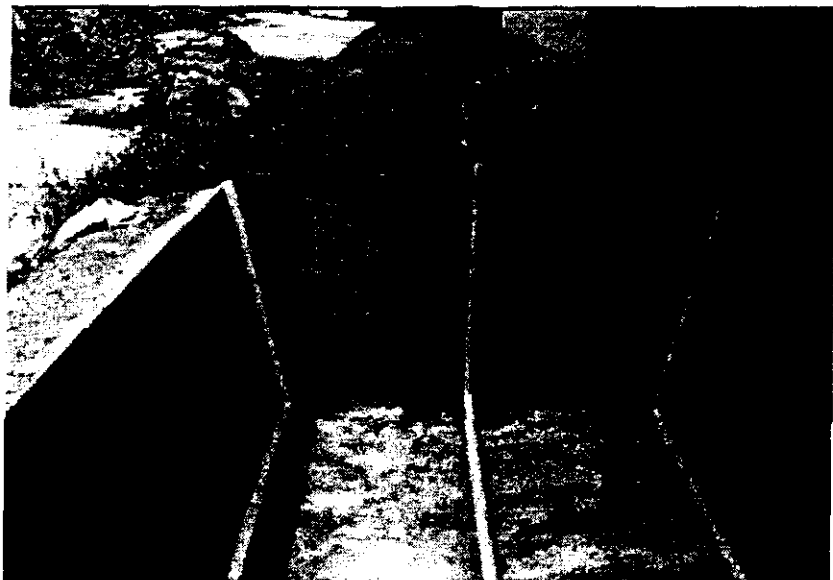
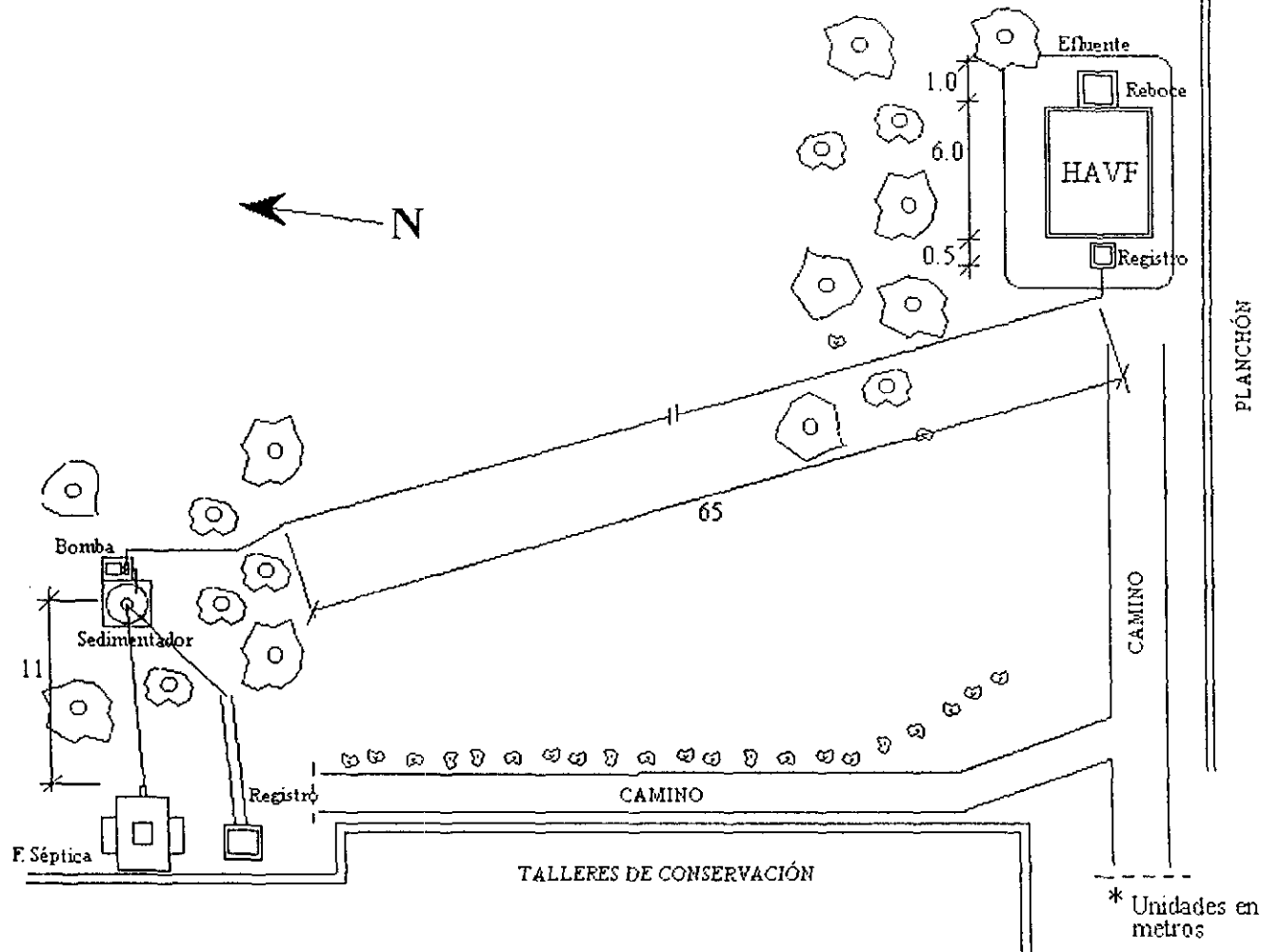


Figura 5. Colocación de las tuberías de drenado en el fondo del HAFV



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PIQAYQA

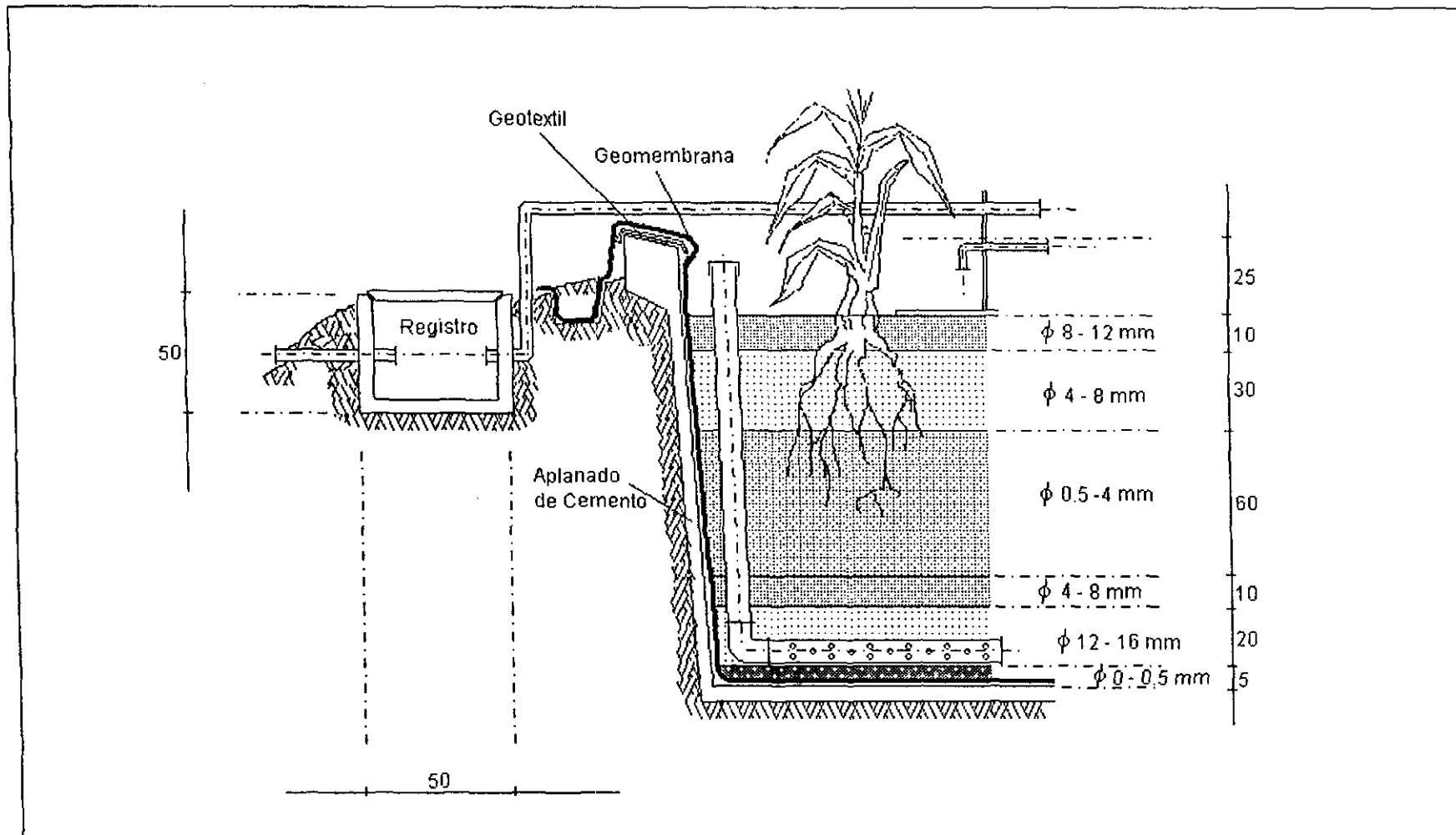
HUMEDAL ARTIFICIAL: Vista aérea Arreglo general del sistema

Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN

Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello.

19 de marzo de 1999



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PIQAYQA

HUMEDAL ARTIFICIAL: Detalle de los perfiles

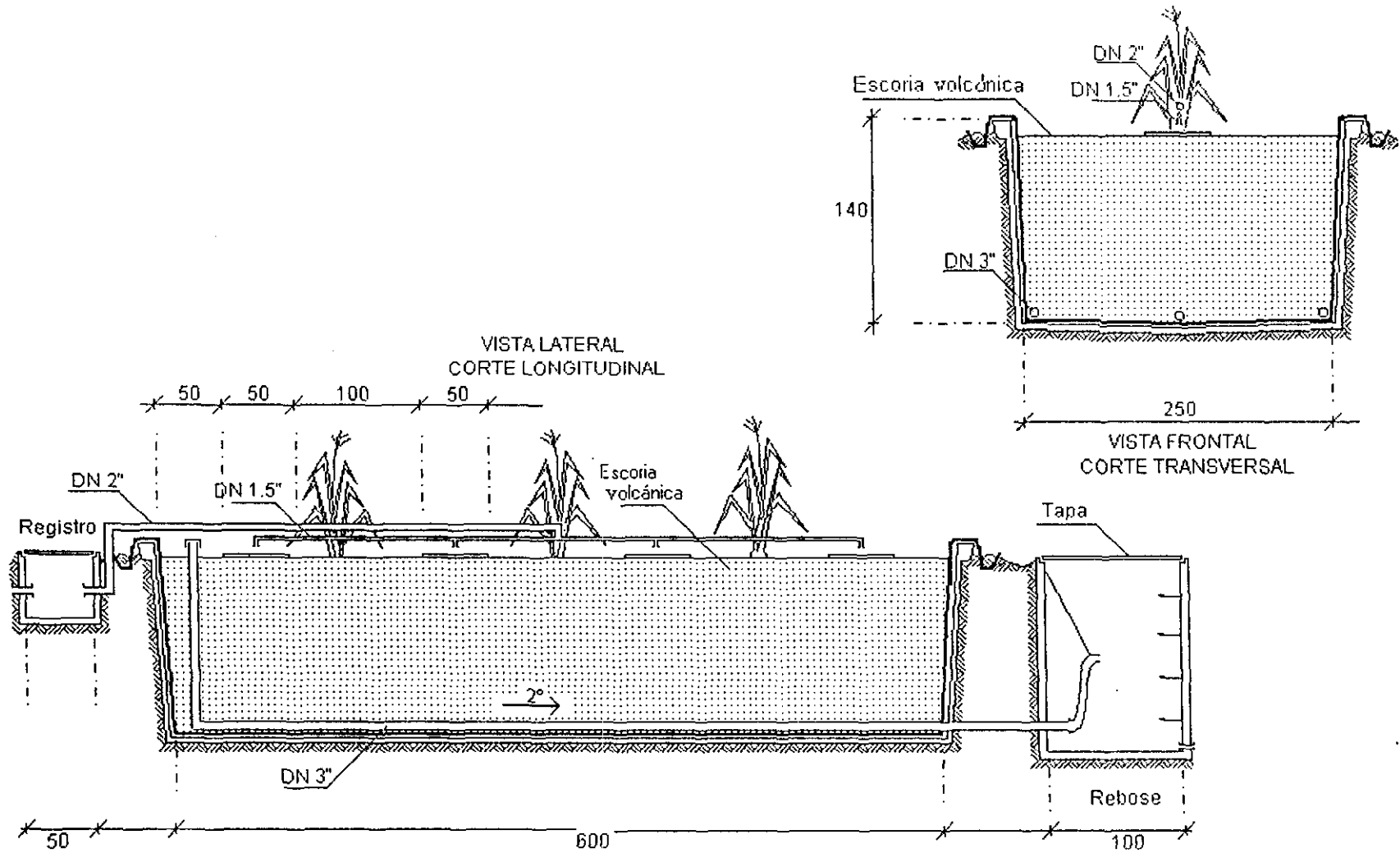
Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN

Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Revisión: Dr. Victor M. Luna Pabello.

19 de marzo de 1999

DIAGRAMA V



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
PIQAYQA

HUMEDAL ARTIFICIAL: Vistas lateral y frontal
Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN
Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello. 19 de marzo de 1999

6.4.3 Drenado, zona de rebose y salida

En el diseño, el agua es captada por tres tubos de PVC sanitario de 3 pulgadas de diámetro que estarán colocados en el fondo del equipo. Estos tres tubos son paralelos, corren longitudinalmente al humedal y se encuentran interconectados en un extremo del mismo (Ver Diagrama IV). En el otro extremo, cada uno de los tubos tiene un tramo de tubo acoplado con un codo de 90°, a manera de respiraderos, que corren hacia arriba del humedal; con el fin de facilitar la limpieza de los tubos en caso de azolvamiento (introduciendo agua a presión con una bomba).

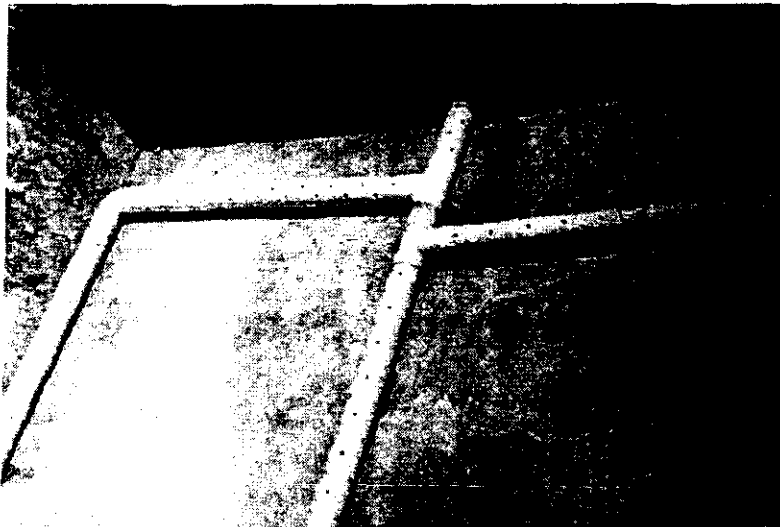


Figura 6.6. Conexión de la tubería de drenado al fondo del HAFV

En el extremo de salida del sistema se cuenta con una zona de rebose, dentro de la cual será colocado un tramo de manguera flexible. Con la manguera se controla el nivel de agua dentro del lecho del humedal. Aunque este diseño es más utilizado en los humedales de flujo horizontal, en el presente caso en particular se piensa controlar el nivel del agua para evitar el desequilibrio biológico durante los periodos de menor consumo de agua, como serían los fines de semana, periodos vacacionales, o paros de emergencia para reparaciones o mantenimiento. Esta zona de rebose estará construida con tabique rojo aplanado con cemento y cerofino e impermeabilizado con una capa de chapopote y otra de pintura de aceite. En el extremo opuesto, se tiene a ras de suelo la salida del agua ya tratada, construida con tubería de PVC sanitaria.

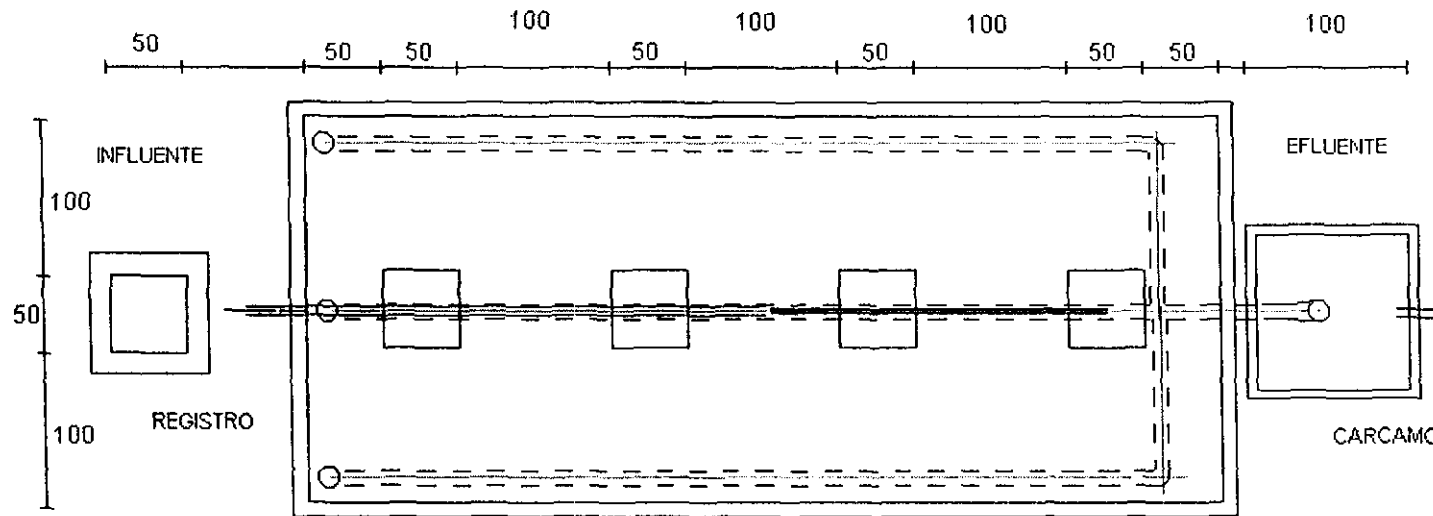
Para la captación y utilización posterior del agua tratada, será necesario que el contenedor sea instalado por parte de la Dirección General de Obras, la cual podrá ser empleada ya sea para el riego de la composta o de las áreas cuyo riego no esté catalogado como restringido. Las características constructivas de cada una de las partes antes descritas se encuentran ampliamente explicadas en los diagramas II, III, IV y V y en la fotografía de la Figura 6.5.

6.4.4 Empacado

El empacado del HAFV debe hacerse de acuerdo con lo que se muestra en el Diagrama V. Para evitar un aumento en los costos y trabajos necesarios, es recomendable que el material de empaque sea comprado ya seleccionado. Este comentario se basa en la experiencia adquirida durante la construcción del HAFH de los Viveros de Coyoacán (Ramírez-Carrillo y Col. 1997; Schaller, 1998), con el fin de no entorpecer el calendario de actividades. El proceso de empacado es de gran importancia, pues ésta es una de las variables más importantes de las que depende el correcto funcionamiento hidráulico del equipo a corto y largo plazos. Los perfiles del humedal se muestran detalladamente en el Diagrama V.

6.4.5 Siembra de plantas

Las plantas, cuya importancia para el proceso de depuración se describe capítulos atrás, deben colocarse con una densidad de 3 plantas por m^2 , aunque algunos autores recomiendan una mayor densidad de plantas por metro cuadrado, dadas las características climatológicas de la Ciudad de México la velocidad de crecimiento y reproducción de estas plantas es muy alta, es recomendable no exceder esta densidad de plantas. Esto puede apreciarse en el seguimiento del proceso de adaptación del humedal construido en los Viveros de Coyoacán en el que fue necesaria una poda antes del primer año de operación del equipo. La siembra debe hacerse antes de colocarse el último nivel de material de empaque en el humedal ya que de este modo el tallo de las plantas quedará cubierto por los últimos 10 cm de gravilla.



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
PIQAYQA

HUMEDAL ARTIFICIAL: Plano aéreo

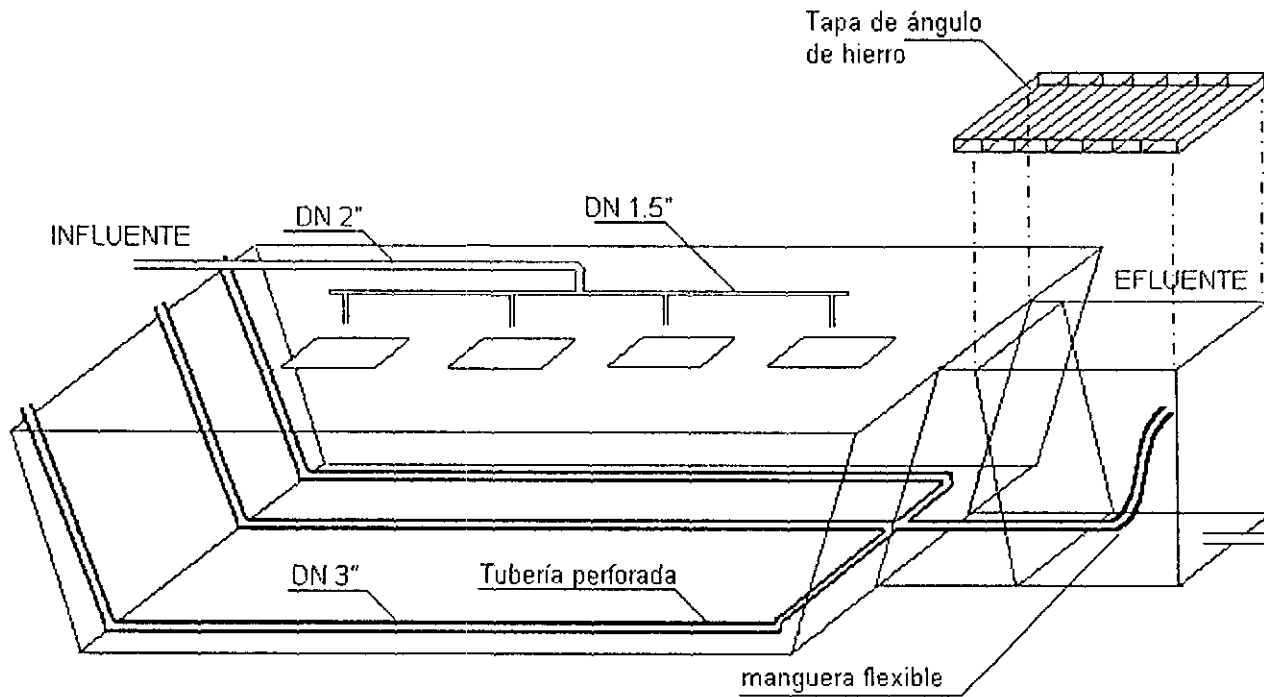
Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN

Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello.

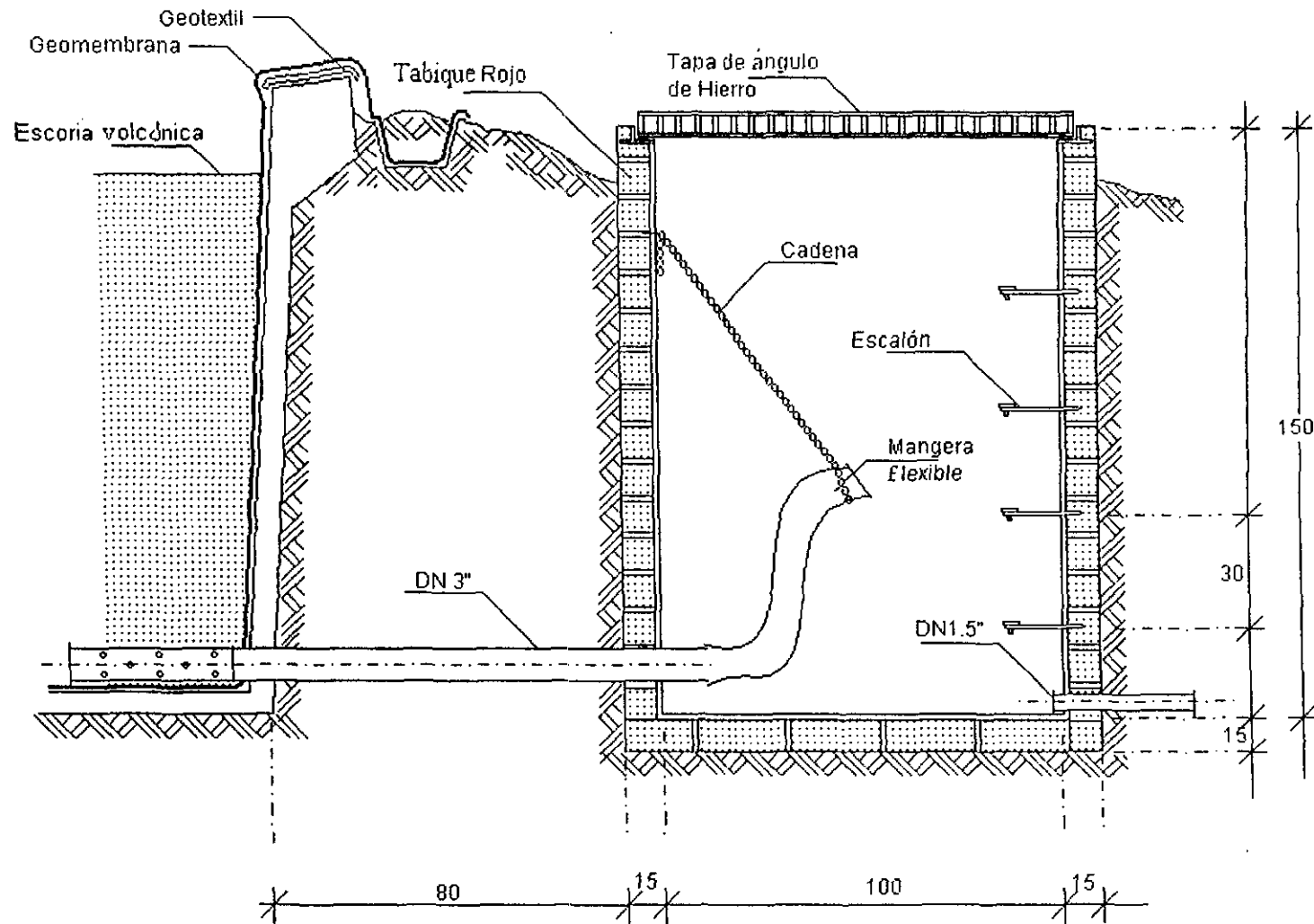
19 de marzo de 1999

DIAGRAMA II



<p align="center">HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL</p>	<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO PIQAYQA</p>
<p>HUMEDAL ARTIFICIAL: Isométrico</p>	<p>Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN</p>
<p>Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural</p>	<p>Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello. 19 de marzo de 1999</p>

DIAGRAMA III



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PIQAYQA

HUMEDAL ARTIFICIAL: Detalle de la zona de rebose
Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN

Revisión: Dr. Victor M. Luna Pabello.

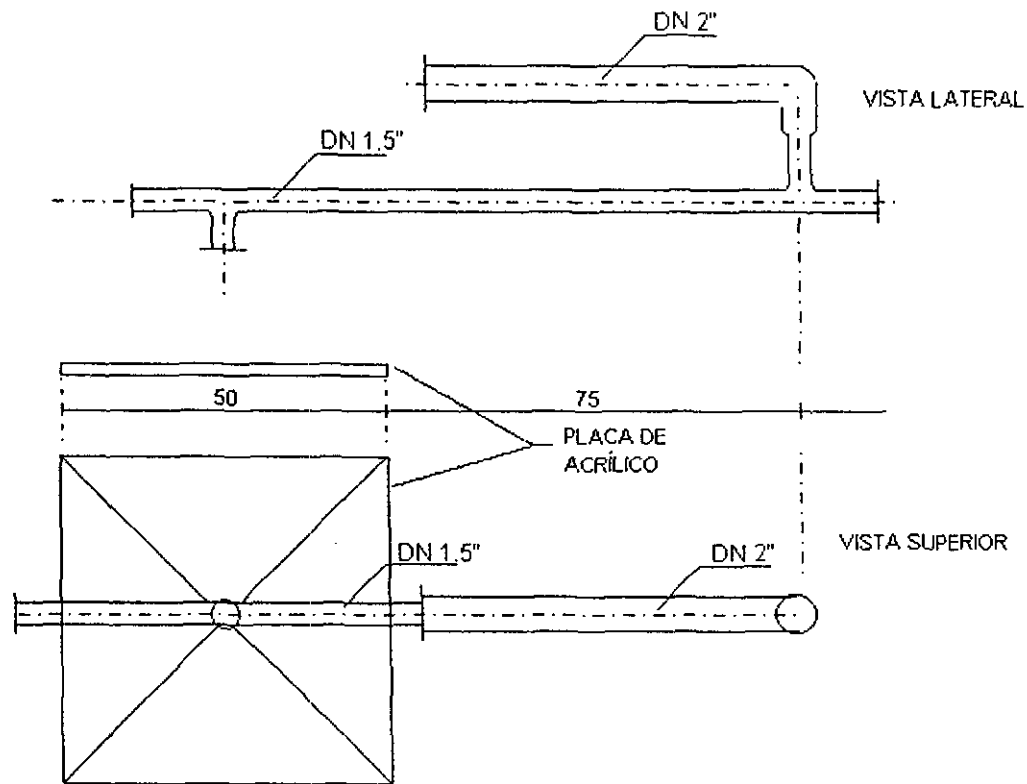
19 de marzo de 1999

DIAGRAMA IV

6.4.6 Tendido de tubería de alimentación

La alimentación de agua a tratar dentro del HAFV se hace por medio de una tubería de PVC de 1 pulgada de diámetro que correrán longitudinalmente por el centro del sistema. Este tubo cuenta con 4 salidas colocadas de manera equidistante una de la otra. Esta conectado por la parte central a otro construido del mismo material pero con diámetro de 1.5 pulgadas proveniente del registro donde se encuentra el medidor de flujo (Ver Diagrama V).

Como ya se mencionó, la alimentación se hace por intervalos intermitentes, para evitar la tendencia del agua a seguir canalizaciones preferenciales, sobre la superficie del material, de empaque serán colocadas 4 placas de plástico de 50 cm x 50 cm justamente debajo de cada una de las salidas de alimentación, estas placas ayudan también a la correcta distribución del agua alimentada por toda la superficie del equipo, el tubo de alimentación se encuentra soportado 35 cm sobre la superficie por varillas de acero roscadas, colocadas en cada una de las placas de plástico antes mencionadas. Esto puede verse con más detenimiento en los Diagramas VI y VII.



HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO
VERTICAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PIQAYQA

IRRIGACIÓN: Detalle de la colocación del equipo de irrigación
Conservación de Áreas Verdes, Zona Cultural

Elaboración: FRANCISCO FENOGLIO LIMÓN
Revisión: Dr. Víctor M. Luna Pabello. 19 de marzo de 1999

DIAGRAMA VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los trabajos y estudios realizados y expuestos en este documento resaltan puntos concluyentes algunos de los cuales se plantean a continuación.

- Se pone de manifiesto que los humedales artificiales son equipos de tratamiento biológico para aguas residuales domésticas que integrados de manera adecuada a un tren de tratamiento, pueden ser considerados como una importante opción para ser utilizados en poblaciones rurales o semiurbanas en todas las zonas de la República Mexicana y, en casos particulares, como el estudiado aquí para tratar los efluentes de pequeñas unidades ocupacionales o edificios tales como hoteles, restaurantes, clínicas y oficinas, entre otros.
- Contar con el HAFV que en esta tesis se desarrolla permitirá, con su operación, realizar evaluaciones experimentales que den lugar a entender y caracterizar importantes variables de diseño y construcción que marquen la pauta para verificar su funcionalidad y capacidad de adaptación a condiciones particulares de operación.
- Con este sistema será posible también, evaluar la capacidad de respuesta a largo plazo de los materiales seleccionados para su construcción así como las modificaciones que se realizaron en comparación con los parámetros más comúnmente recomendados en la bibliografía relacionada con la construcción de humedales. Se podrá evaluar la eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación con los humedales de flujo horizontal operándolos bajo las mismas condiciones generales.
- Contar con este tren de tratamiento permitirá también, aunque en menor medida de lo deseado, evitar la descarga de aguas residuales que contaminan los mantos acuíferos de Ciudad Universitaria. Asimismo, se proveerá de agua suficiente con calidad adecuada para ser utilizada en las labores de "composta" realizadas por personal de los mismos talleres de conservación de áreas verdes de la DGOySG o dado que el sistema se proyectó para que el efluente resultante cuente con las características adecuadas y suficientes, pueda ser utilizado para el riego de las áreas verdes aledañas a los edificios de esta dependencia universitaria.

- En las pruebas experimentales realizadas previamente al diseño del sistema se obtuvieron resultados que definen a la escoria volcánica estudiada como la mejor opción para ser utilizada como material de empaque para el humedal. Aún cuando los resultados obtenidos no permiten evaluar el comportamiento de este material a largo plazo, éste responde de manera mucho más favorable que la grava recomendada en la mayor parte de la bibliografía consultada.
- Con el desarrollo de este trabajo se sentaron las bases para un protocolo de trabajo a seguir en el caso de desear construir un HAFV con dimensiones reales pues se tiene una línea de trabajo definida y probada que agilizaría en gran medida el trabajo que se realizara, aún cuando las características propias del sitio fueran diferentes a las presentadas en este documento en particular.
- En términos particularmente constructivos, la realización de esta fase se logró llevar a un punto, si no concluyente, si tal que permite la terminación del mismo sin que quepa la posibilidad de que se pudiera presentar complicación alguna realmente relevante.
- A lo largo de este proyecto se intentó evaluar la posibilidad de modificar una característica constructiva importante para sustituir el uso de la geomembrana de PPE (Polipropileno) utilizando un método distinto de impermeabilización del sitio. Durante las entrevistas que se tuvieron con las autoridades de la DBOySG se acordó sustituir la geomembrana por una construcción hecha a base de ferrocemento, cuyas características se describen en el capítulo anterior. Esto tenía como finalidad reducir los costos de construcción. Desgraciadamente dadas las características del sitio al poco tiempo de terminada esta fase de la construcción, la alternativa no dio los resultados esperados lo que llevó a recomendar la utilización de la geomembrana inevitablemente.
- Aún cuando la utilización del ferrocemento no cumplió con la función esperada, sí tiene una utilidad inmediata, ya que gracias a esto será posible utilizar geomembrana con un grosor

inferior al recomendado por la bibliografía puesto que esta disposición previa del sitio disminuye considerablemente el posible daño o desgaste del PPE.

- Por otro lado, dado que el terreno no está bien apisonado, por estar formado por material de relleno, este trabajo de aplanado realizado en el sitio, aún estando fisurado, ayuda a la contención de las paredes del humedal evitando que éste se deforme por los acomodamientos y deslaves naturales del terreno.

Para continuar con las actividades para las cuales fue conceptualizado y diseñado este HAFV incluido dentro de un tren de tratamiento con finalidades claramente descritas y que a su vez forma parte de los proyectos realizados por el PIQAYQA de la Facultad de Química se hacen a continuación algunas recomendaciones.

- Terminar las labores de construcción del tren de tratamiento e iniciar las pruebas de arranque y estabilización del mismo. Es recomendable que durante esta etapa de arranque y estabilización, se tomen las medidas pertinentes para diseñar un plan de trabajo que permita detectar y evidenciar las posibles complicaciones que pudieran presentarse durante esta etapa para capitalizarlas en términos de evitar la repetición de estas fallas en otros proyectos similares y así lograr contar con un mayor conocimiento de estos procesos.
- Diseñar un esquema de trabajo para ser utilizado durante la estabilización del equipo para, a través del seguimiento de las diferentes variables representativas, poder definir el comportamiento cinético en esta fase inestable de la operación de los diferentes equipos.
- Elaborar un programa de operación y mantenimiento de acuerdo con las experiencias adquiridas durante esa etapa del proyecto que incluya en las bitácoras los procedimientos de purga y limpieza de la fosa séptica, del tanque de homogeneización sedimentación y de poda de plantas, entre otras características importantes del mantenimiento

- Realizar actividades rutinarias de análisis de muestras para verificar la estabilidad operativa y depurativa del equipo y, en caso necesario, hacer las modificaciones pertinentes para hacer más eficiente la operación de este sistema.
- Siendo el objetivo de este sistema la evaluación experimental de su operación y eficiencia depurativa, se abre la posibilidad al desarrollo de nuevas líneas de investigación sobre este sistema. Una aproximación a las posibles vertientes que se podrían generar a raíz de este trabajo se encuentran expresadas en el capítulo 3 de este documento entre las cuales destacan, por ejemplo, la definición los periodos de estabilización funcional y los efectos derivados de las condiciones climatológicas predominantes en la Ciudad de México y particularmente en la zona de la Ciudad Universitaria.
- A través del estudio del comportamiento de este tren de tratamiento se contaría con una importante herramienta para generar un algoritmo de diseño que simule de manera correcta su comportamiento.
- Los resultados obtenidos tras la operación de este sistema pueden ser utilizados como una base para poder redactar posteriormente un manual de operación y mantenimiento aplicable a cualquier humedal artificial de flujo vertical.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ackermann, R. 1994. Controles lógicos programables, Nivel básico TP 301, Festo Didactic. Esslingen, Alemania.
2. Adler, P. 1996. Evaluation of a wetland system design to meet stringer phosphorus discharge requirements. *Wat. Environ Res.* 68 (5): 836-840.
3. Armstrong, J y Armstrong, W. 1990. Pathways and mechanisms of oxygen transport in Phragmites australis. En *Memories of Constructed Wetland Water Pollution Control*. Viena, Austria.
4. APHA. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. 19ª Ed. American Public Health Association. AWWA y WPCF. Washington, DC, EEUUA.
5. Bahlo, K. y Wach, G. 1995. 3ª Ed.. *Naturnahe Abwasserreinigung: Planung und Bau von Pflanzenklaeranlagen*. Auflage Staufen bei Freiburg. Pp. 138-146
6. Bogdanowicz, R. 1996. Ecotechnology in wastewater management: Functioning facilities in the Galtic Region. En 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena Austria. Poster 3.
7. Brix, H. 1987. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants: The root-zone method. *Wat. Sci. Tech.* 19(1): 107-118.
8. Brix, H. 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal processes, and treatment performance. Pre-print from: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvment*. Lewis Publisher. Tokio, Japón. Pp. 9-21.

9. Brix, H. 1994. Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. En Pre-print of paper presented at the IAWQ Biennial Conference. Budapest, Hungría. Pp 344-389.
10. Brix, H 1996. Role of macrophytes in constructed wetlands. En 5th International Conference on Wetland systems of Water Pollution Control. Viena, Austria. Poster 4.
11. Conley, L. M. 1991. An assessment of the root zone method of wastewater treatment. JWPCF. 63(1): 239-247.
12. Cooper, P., Job, G y Green M. B. 1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. Wrc. Severn Trent Water. Reino Unido. Pp 123-138.
13. Durán-Domínguez C. 1994. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso. Departamento de Alimentos y Biotecnología, División de Ingeniería. Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria. Mexico, D.F.
14. Gersberg, R. M. 1985. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. Wat. Res. 20: 363.
15. Green. M. B. y Uptin, J. 1994. Constructed reed beds. A cost-effective way to polish wastewater effluents for small communities. Wat. Environ. Res. 31(2): 4-44.
16. Green, M. B. y Upton, J. 1995. Constructed reed beds: Appropriate technology for small communities. Wat. Environm. Res. 32(3): 339-348.
17. Haberl, R. 1997. Constructed wetlands in Europe with emphasis to Austria. En Tercer Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D. F. México. Pp. 232-245.

18. Haberl, R. y Perfler, R. 1995. Plantanlagen zur Abwasserreinigung mit Pflanzen im Oberoesterrich 4. Zwischenbericht. Institut fur Wasservorsorge, Cevaesserguete und Fischereiwirtschaft, Abteilung fur Siedlungswassergau un Industriesasserwirtschaft. Pp 142-151.
19. Hu, K. P. 1994. Overview: Design of subsurface flow constructe wetland sistems. 4th International conference on Wetlands systems For water pollution control. China. Pp 13-24.
20. Jimenez-Tovar, J. 1999. Construcción y arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo horizontal. Tesis de licenciatura Facultad de Química UNAM México, D. F. México.
21. Kadlec, R. H. 1996. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Vienna. Austria. Poster 9.
22. Luna-Pabello, V. M., Durán-de-Bazúa, C., Ramírez-Carrillo, H., Fenoglio-Limón, F. y Sánchez-García H. 1997 a. Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química. San Luis, Argentina. Pp 50-56.
23. Luna-Pabello, V. M., Durán-de-Bazúa, C., Ramírez-Carrillo, H., Fenoglio-Limón, F. y Sánchez-García, H 1997b. Sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas a base de humedales artificiales. Una tecnología alterna para la protección del equilibrio ecológico en zonas urbanas. En Memorias de las III Jornadas Panamericanas. Medio Ambiente y Vivienda. Zacatecas, México. Pp 78-83.
24. Luna-Pabello, V. M., Ramírez-Carrillo, H., Fenoglio-Limón, F. 1997c. Informe de actividades sobre el estudio de humedales artificiales. Revisión bibliográfica, pruebas

- experimentales a nivel laboratorio y propuestas de diseño a nivel de planta piloto. Informe interno HA-MEX-01-1997. Facultad de Química, UNAM. México, D. F.
25. Mander, U. 1996. Constructed wetlands for wastewater treatment in Estonia. En 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena. Austria. Pp IX/7-1 – IX/7-7.
 26. Meixner, H y Sauer, E. 1990. Introducción a la electroneumática, Manual de estudio, Festo Didactic. Esslingen, Alemania.
 27. Metcalf, E. 1991. Wastewater Engineering. McGraw-Hill International Editions. EEUUA.
 28. Millán-Hernández S. 1999. Operación de una planta piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal para tratamiento de aguas residuales y su reuso para riego. Tesis de licenciatura UNAM México, D.F. México.
 29. Netter, B. 1990. Sewage treatment by planted soil filters. En Memories of Constructed Wetland Water Pollution Control. Wat. Sci. Tech. Pp. 525-528.
 30. Norma Oficial Mexicana, NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas en bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Enero 6 de 1997
 31. Norma oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminación para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación. Septiembre 21 de 1998. México, D. F. México.
 32. Oke, B. H. 1996. Removal of heavy metals from domestic wastewater using constructed wetland system. En 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena. Austria. Pp I/17-1 – I/17-9.

33. Önorm B 2505. 1997. Bepflanzter Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) Anwendung, Gemesung, Bau und Betrieb. Viena, Austria.
34. Perry, R. 1982. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6ª Edición. Mc. Graw Hill. Kansas, EEUUA.
35. Phillips, J. 1989. Fluvial sediment storage in wetlands. *Wat. Resour. Bull.* 25(4): 867-873.
36. Poiani, K. A. 1995. Sensitivity of a prairie wetland to increased temperature and seasonal precipitation changes. *Wat. Resour. Bull.* 31(2): 283-293.
37. Rase, F. 1973. Ingeniería de proyectos para plantas de proceso. CECSA. México D.F. México.
38. Ramírez-Carrillo, H., Fenoglio-Limón, F., Durán-de-Bazúa, C. y Luna-Pabello, V. M. 1997. Evaluación de la conductividad hidráulica y eficiencia de remoción de materia orgánica en columnas empacadas con grava. Tercer Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D. F. Pp. 191-196.
39. Ramírez H. 1998. Desarrollo de la ingeniería básica para una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal Tesis de licenciatura Facultad de Química UNAM. México.
40. Reed, S. C. 1992. Constructed wetland design: The first generation. *Wat. Environ. Res.* 64(6): 776-782.
41. Reed, S. C. y Brown, D. 1995. Subsurface flow wetlands: A performance evaluation. *Wat. Environ. Res.* 76(2): 244-299.
42. Rivera, F. Ramírez, E. y Gallegos, E. 1995. Removal of pathogens from root zone. *Wat. Sci. Tech.* 32(3): 113-119.

43. SARH. 1991. Programa Nacional de Aprovechamiento del Agua 1991-1994. Subdirección General de Planeación y Finanzas de la Comisión Nacional del Agua. Estado e México, México. Pp 71-72.
44. Schaller, P. 1998. Planning, construction and investigation of a constructed wetland for the secondary treatment of domestic wastewater in Mexico City. Tesis de Licenciatura BOKU. Viena, Austria.
45. SEDESOL. 1993. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. Pp 120-123.
46. SEDUE 1987. Ecología. 100 acciones necesarias. Comisión Nacional de Ecología. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Poder Ejecutivo Federal. México, D. F. México.
47. SEDUE. 1990. Programa Nacional Para la Protección del Medio Ambiente 1990-1994. Secretaría de Desarrollo Urbano Y Ecología. México. Pp 65-66.
48. Sereico, P. y Lameo, C. 1988. Use of wetlands for wastewater treatment. Civil Engineering Practice 5. Wat. Res. Environ. Technomic Publishing Co. Inc. EEUUA. Pp. 767-787.
49. Tanner, C. y Sukias, P. 1995. Accumulation of organic solids in gravel bed constructed wetlands. Wat. Sci. Tech. 32(3):229-239.
50. Thomas, P. R. y Glover, P. 1995. An evaluation of pollutant removal from secondary treated sewage effluent using a constructed wetland system. Wat. Sci. Tech. 32(3): 87-93.
51. Van Valkenburgh, N y Neville, 1983. Electrónica básica. Volumen 1 CECSA. México, D.F, México.

52. Wood, A. 1990. Constructed wetlands for wastewater treatment: Engineering and design considerations. En *Memories of Constructed Wetland Water Pollution Control*. Pp 535-537.
53. Wood, A. 1995. Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. *Wat. Sci Tech.* 32(3) 21-29.
- 54.

ANEXO

Memoria de Cálculo

Balance global de agua

El sistema de HAFV, objeto de este trabajo, tiene como objetivo principal, el de ser utilizado para determinar experimentalmente las condiciones de operación adecuadas. Es importante para ello determinar el balance de agua que defina las condiciones de alimentación adecuadas.

Para este balance se requiere de datos como el volumen de evapotranspiración y el volumen de precipitación anual, este último es un promedio del obtenido mensualmente durante el año de 1997 en el Distrito Federal y se encuentra citado páginas atrás.

Balance de agua en el tanque sedimentador

Partiendo del principio:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Entrada} \\ \text{de} \\ \text{agua} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Salida} \\ \text{de} \\ \text{agua} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de} \\ \text{agua} \end{array} \right\}$$

Se obtiene la ecuación:

$$dV/dt = (fve) - (fvs + fr + Pl)$$

Donde:

dV/dt : volumen de acumulación en el sistema ($m^3/año$)

fve : flujo volumétrico anual de entrada al sedimentador ($m^3/año$)

fvs : flujo volumétrico anual de salida del sedimentador ($m^3/año$)

fr : flujo de rebose anual ($m^3/año$)

Pl : flujo volumétrico anual por purga de lodos húmedos ($m^3/año$)

Para la determinación del valor del flujo volumétrico anual por purga de lodos (P_l) se tomó como referencia la fracción equivalente de sólidos sedimentables (S_{se}) en mL/L correspondiente a la alimentación anual al sedimentador (ver tabla 5.3). El flujo de rebose anual (f_r) tiene valor de cero pues se considera que para una operación correcta, no debe existir flujo. Éste se utilizaría únicamente cuando la alimentación del sedimentador fuera superior al flujo de salida. Finalmente, como en el sedimentador no existe acumulación de agua, el valor de dV/dt es también igual a cero.

De este modo los valores para cada variable son los siguientes:

$$dV/dt=0$$

$$f_{ve}=219.43 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$f_{vs}=219.0 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$f_r=0$$

$$P_l=0.43\text{m}^3/\text{año}$$

Balance de agua en el HAFV

Partiendo del mismo principio usado en el balance de agua para el sedimentador, la ecuación que define el balance de agua en el HAFV es la siguiente:

$$dV/dt = (f_{ve}+P_p) - (f_{vs}+I+Et)$$

Donde:

dV/dt : volumen de acumulación en el sistema ($\text{m}^3/\text{año}$)

f_{ve} : flujo volumétrico anual de entrada al HAFV ($\text{m}^3/\text{año}$)

f_{vs} : flujo volumétrico anual de salida del HAFV ($\text{m}^3/\text{año}$)

I : flujo de infiltración anual ($\text{m}^3/\text{año}$)

P_p : volumen de precipitación pluvial anual ($\text{m}^3/\text{año}$)

Et : volumen de evapotranspiración anual ($\text{m}^3/\text{año}$)

El valor del flujo de infiltración anual (I), representa la cantidad de agua que se pierde por infiltración hacia los alrededores del sistema. Un criterio importante para el diseño de cualquier humedal es el impedimento de este fenómeno y pueden utilizarse varios métodos para lograrlo, por tal motivo se considera como cero el valor de esta variable.

Los valores del volumen de precipitación pluvial anual (Pp) fueron tomados del sistema "SIMBAD" del INEGI (ver Tabla 5.7). La determinación del volumen de evapotranspiración anual, depende de diversas condiciones como son temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad de los vientos y desarrollo de las plantas del sistema, este valor puede obtenerse recurriendo a fuentes bibliográficas (Adler, 1996; Phillips, 1989, Poiani, 1995) o puede determinarse experimentalmente (Millán-Hernández, 1999). La precisión con la que se mida esta variable dependerá, entre otros factores, del tiempo que dure la prueba.

Los valores para estas variables en el equilibrio son las siguientes:

$$dV/dt=0$$

$$f_{ve}=219.0 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$f_{vs}=219.9 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$I=0$$

$$P_p=11.85 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$E_t=10.95 \text{ m}^3/\text{año}$$

Diseño

Estimación del área superficial

Para sistemas menores que 100 P.e. una de las ecuaciones de diseño más recomendadas para el dimensionamiento de HAFV es la correlación siguiente:

$$A=3.5 P^{0.35} + 0.6 P$$

Donde:

A : Área superficial (m²)

P : P.e. (65g DBO₅/ persona día)

Si los flujos estimados para cada zona son:

$$Q_1= 4800 \text{ L/día}$$

$$Q_2= 1400 \text{ L/día}$$

respectivamente, los valores de Pe para cada uno son:

$$Pe_1=32$$

$$Pe_2=10$$

El área superficial con la que debe de contar cada humedal es respectivamente:

$$A_1=31 \text{ m}^2$$

$$A_2=14 \text{ m}^2$$

Siendo que por cuestiones operativas el área del HAFV se fijó previamente en 15 m² se quiere estimar el volumen que se debe tratar, y si la cantidad de agua utilizada en las instalaciones es suficiente para operar el equipo de manera adecuada.

El valor de P se obtiene de la tabla siguiente construida a partir de la correlación anterior.

P.e (Número de personas)	A ₁ (m ²)
1	4.10
2	5.66
3	6.94
4	8.08
5	9.14
6	10.15
7	11.11
8	12.04
9	12.95
10	13.83
11	14.70
12	15.50
13	16.38

Tabla D.1. Determinación de la carga orgánica en función del área superficial

De acuerdo con los estándares una persona produce diariamente un promedio de 150 litros de agua residual, así pues para un valor de 11 P.e se estiman 1655L/día.

Es importante señalar que este valor debe de ser considerado como un valor máximo puesto que este volumen puede ser tratado considerando una reducción cercana al 90% de eficiencia pero únicamente en la concentración de DBO₅ y considerando que no se desea la reducción en las concentraciones de nitrógeno y fósforo. Para tal efecto la bibliografía recomienda utilizar valores de área de entre 3 y 5 m² por P.e. Considerando lo anterior, el volumen a tratar fluctúa entre 1125L y 450L por tratar diariamente dependiendo de la eficiencia que se desea obtener en la remoción de estos contaminantes.

Por tal motivo el tren de tratamiento, por tratarse de un sistema experimental, debe de ser capaz de manejar este rango en el volumen de alimentación, esto debe hacerse modificando la duración de cada intervalo de alimentación.

Alimentación

La alimentación debe hacerse en cuatro intervalos regulares a lo largo del día, con un rango de entre 112 L y 280 L por intervalo dependiendo del volumen que se desee alimentar. Partiendo de que una bomba de ½ H.P tiene una capacidad promedio de 1300 LPH y el medidor de flujo seleccionado para este caso tiene una capacidad máxima de 400 LPH los intervalos de alimentación deben tener periodos de entre 30 minutos y 1 hora, esto dependiendo de las características del equipo de control utilizado.

Tabla A.1. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-ECOL-003-1997).

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO5 mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	5	15	30	30

DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la medida de la cantidad de oxígeno empleada por bacterias para oxidar la materia orgánica contenida en una muestra. La muestra de agua residual se coloca dentro de una botella de color ámbar, con gran cantidad de aire en su parte superior. La botella se conecta a un manómetro cerrado.

Las bacterias consumen el oxígeno disuelto, que reemplaza por el oxígeno del aire encerrado en la botella. Esto reduce la presión dentro de la botella, cuya reducción es registrada por el manómetro. La caída de presión puede leerse directamente como mg/L DBO en la escala del manómetro. El bióxido de carbono producido por la oxidación es absorbido por los cristales de hidróxido de litio contenidos en la tapa selladora. Los resultados del método manométrico son comparables con el método APHA estándar.

Procedimiento

Mediante el método manométrico usando el aparato manométrico HACH, modelo 2173B (Figura A.2.).

1. Seleccionar el volumen apropiado de la muestra, según la tabla siguiente:

Tabla A.2. Determinación del volumen de la muestra y escala requerida

Intervalo de DBO de la muestra (mg/L)	Volumen de la muestra (mL)	Escala requerida (mg/L)
0-35	420	0-35
0-350	160	0-350
0-70	355	0-70
0-700	95	0-700

2. Agregar la muestra en la botella para muestras. La muestra debe encontrarse alrededor de 2°C de su temperatura de incubación al ser analizada.

3. Introducir una barra de agitación de 3.8 cm en la botella de muestra.
4. Agregar el contenido de una almohadilla de reactivo en polvo de hidróxido de litio a la tapa selladora. Evitar que las partículas del polvo caigan dentro de la muestra. Si esto sucediera, debe prepararse nuevamente una muestra.
5. Aplicar una pequeña cantidad de grasa "Lubrisela" al borde sellador de la tapa, para garantizar el sellado hermético.
6. Colocar la botella en la base del aparato, conectar el equipo al suministro de energía eléctrica y encenderlo.
7. Teniendo abierto el tapón del cilindro manométrico, cerrar, sin apretar, la tapa de la botella.
8. Poner el equipo dentro de una incubadora a 20°C y dejar pasar 30 minutos hasta que se equilibre la temperatura.
9. Apretar lentamente el tapón del manómetro y posteriormente apretar la tapa de la botella. Si la muestra no ha alcanzado el equilibrio térmico, puede aparecer inmediatamente una lectura positiva o negativa. Si esto sucede, aflojar el tapón del cilindro manométrico y la tapa de la botella y repetir la operación.
10. Aflojar las clavijas de la escala del manómetro y colocar la marca de cero en la cima de la columna de mercurio. Si la escala del manómetro no puede ser ajustada a cero, aflojar levemente la tapa de la botella y el tapón del cilindro manométrico, apriétense nuevamente y ajústese nuevamente la escala.
11. Anotar la composición de la muestra, la fecha y hora en que se comenzó la prueba. Registrar por lo menos cada 24 horas la lectura de la muestra.

Interpretación de resultados

Los resultados durante los primeros cinco días (DBO_5) deben ir en aumento día con día y la diferencia entre las lecturas puede volverse progresivamente menor. La figura A.1 muestra algunos ejemplos del comportamiento progresivo del valor de DBO en función del tiempo.

Curva A, trazo típico de DBO

Curva An, ejemplo de nitrificación

Curva B, indica fuga en el sistema manométrico

Curva H, Demora de la oxidación al inicio, debido probablemente a un número limitado de bacterias en la muestra.

Curva K, la muestra tiene un valor de DBO muy alto. Cuando se desconoce el intervalo de DBO de la muestra, se recomienda efectuar y analizar varias diluciones o hacer una prueba de DQO (Demanda química de oxígeno) para establecer el intervalo.

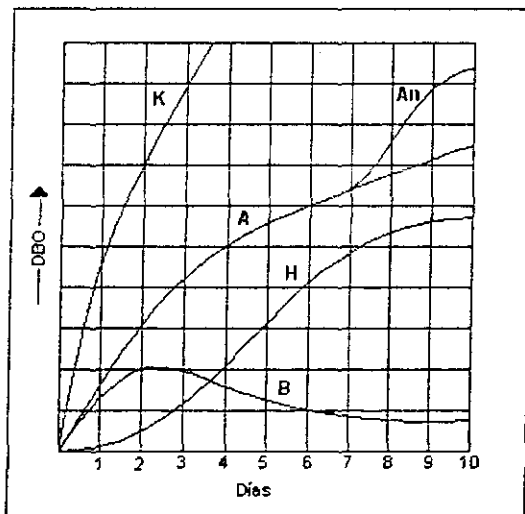


Figura A.1 Ejemplos de curvas de la DBO

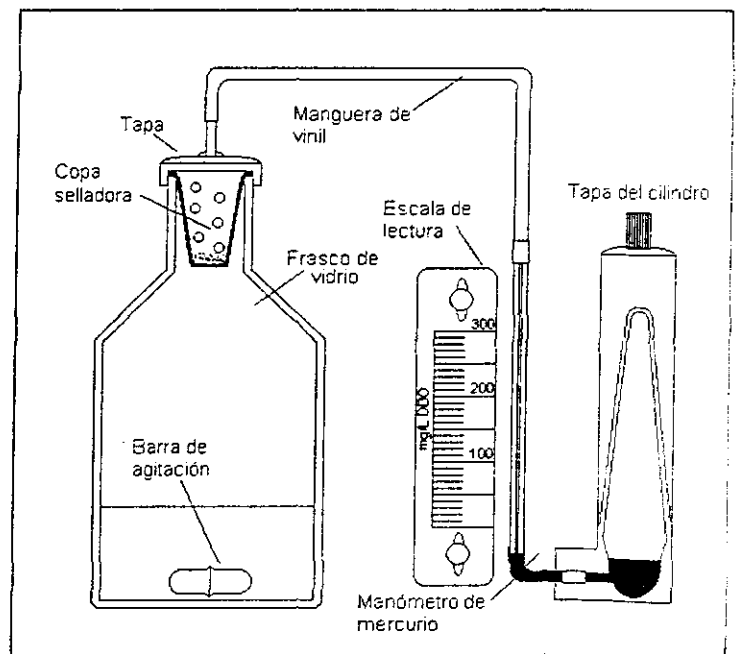


Figura A.2 Accesorios del medidor manométrico