

50521
63



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA "CAMPUS II"

"COMPORTAMIENTO DINAMICO DE DOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL Y VERTICAL"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N :
RODRIGUEZ (CRUZ) ARTURO
VARELA MONTELLANO ENEDINO



MEXICO, D. F. **TESIS CON FALLA DE ORIGEN** SEPTIEMBRE, 2003



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/055/03

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: RODRÍGUEZ CRUZ ARTURO
P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha
propuesto a los siguientes sinodales:



Presidente:
Vocal:
Secretario:
Suplente:
Suplente:

I.Q. José Mariano Ramos Olmos
Dra. Carmen Durán de Bazúa
Q.F.B. Miriam Muñoz Rivera
M. en C. José Nuñez Flores
I.Q. María del Rocío Luja Hernández



Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 23 de Mayo de 2003

EL JEFE DE LA CARRERA



M. en C. ANDRÉS AQUINO ARCHOLA
SECRETARIA TÉCNICA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JICIQ/056/03

ASUNTO: Asignación de Jurado



ALUMNO: VARELA MONTELLANO ENEDINO
P r e s e n t e .



En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	I.Q. José Mariano Ramos Olmos
Vocal:	Dra. Carmen Durán de Bazúa
Secretario:	Q.F.B. Miriam Muñoz Rivera
Suplente:	M. en C. José Nuñez Flores
Suplente:	I.Q. María del Rocío Luja Hernández

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 23 de Mayo de 2003

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRÉS AQUINO GANCHOLA
INGENIERIA QUIMICA
SECRETARIA TECNICA



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



RECONOCIMIENTOS

De Arturo:

A mis padres:

Arturo Rodríguez Maqueda y María del Carmen Cruz Cerilo por que gracias a su amor, apoyo y comprensión en todo momento es que fue posible alcanzar este logro "Gracias".

A mi hermana:

Claudia Rodríguez Cruz: por creer en mi y tenerme esa enorme paciencia.

A mis amigos (as):

Por que su amistad es uno de mis más grandes tesoros.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM):

Por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



A la Dra. En Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa:

Por su apoyo incondicional y valiosos comentarios durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Alfonso Durán Moreno:

Por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Al CONACYT SIGOLFO:

Por otorgar una beca para el desarrollo del presente trabajo.

A todo el personal que labora en los laboratorios del PIQA Y QA:

Por todo el apoyo otorgado durante mi estancia en los laboratorios del PIQA Y QA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La Vida es tanto más hermosa cuanto más espera uno de ella. El que cree que ya lo ha vivido todo; el que piensa que mañana será igual a hoy; el que sostiene que cualquier tiempo pasado fue mejor, ese... no vive, o vive anestesiado por su propia falta de esperanza. Prefiero vivir literalmente convencido de que lo mejor de mi vida no ha llegado todavía.

- J. L. Martín Descalzo, en Blanco y Negro
(España)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Enedino:

A mis padres:

Se dice que detrás de un gran hombre hay una gran mujer, pero detrás de una gran persona hay unos grandes padres.

Papá, mamá, gracias por esta gran herencia que me han otorgado, por su apoyo incondicional y sobre todo por las frases de aliento cuando todo parecía estar muy mal.

A mis hermanos y hermanas:

Por la compañía en las noches en vela.

A mis profesores:

Quienes me enseñaron a leer y escribir, que me orientaron y apoyaron en todo momento.

A mis compañeros y amigos del SEA en el Colegio de Bachilleres 3:

Gracias por conservar esa amistad que aún nos une, C. P. Rubén Zavala Bermejo, Lic. Alfredo de la Cruz García, L. A. E. Jaime Sosa López, Elizabeth Ortiz Romero, Gabriel Solís Lozano y Gustavo González Pineda.

M. en C. María Teresa Mayra Millán Tapia, la promesa está cumplida.

TPSIS CON
FALLA DE ORIGEN



A mis compañeros los patanes de I. Q. Generación 2001 de la F.E.S. Zaragoza.

Angulo Ortiz Carlos
Anselmo López Sergio
Ayala Morales Ángel
Castellanos de la Rosa Gilberto
Colón Téllez Martín
De la Cruz Hidalgo Ernesto
Feria Hernández Pedro
Flores Flores Víctor Fidel
Flores Hugo Miguel †
García Bautista Julio
García Fernández Ricardo
Gómez Gaytán Ricardo
Isol Jaime Ruth
Jacobo Luna Oscar
Lugo Maldonado Juan Ángel
Luis Rojas Alejandro
Maldonado Sánchez Blas
Marrón Arriola Braulio César

Martínez Cohetero José Luis
Mendoza Monroy Claudia
Morales Vázquez Ma. de Lourdes
Netzahual Xochitemol Ramiro Gerardo
Pacheco Ordaz Faustino
Paredes Figueroa Cecilia
Rangel Ortega Andrés
Reyes Ordóñez Ramón
Rivera Villagómez Yazmin
Rodríguez Cruz Arturo
Rosas Medina Ernesto Alejandro
Sánchez Sánchez Angélica
Sandoval Villanueva Zula Genny
Tesillos Martínez Carmela
Ubaldo Alvide Ricardo Emmanuel
Valdez Romualdo Israel

A la Dra. en Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa:

Por el apoyo incondicional otorgado en el desarrollo de este trabajo.

Al CONACYT SIGOLFO:

Por otorgarnos una beca para el desarrollo de este trabajo.

A la Bióloga Ma. de Lourdes Hernández González:

Gracias por todas las facilidades otorgadas dentro del Vivero Forestal de Coyoacán.

A todo el personal que labora en los laboratorios del PIQA y QA:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



..."Disfruta de tus logros como de tus proyectos.
Que el interés por tu carrera, aunque sea muy
humilde, se mantenga vivo, en los vaivenes que
el tiempo obra en la fortuna, tu carrera es un
verdadero tesoro"...

DESIDERATA
POR MAX EHRMANN
(1872 - 1945)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
JURADO	ii
RECONOCIMIENTOS	iii
TABLA DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
GLOSARIO	xix
LISTA DE ABREVIATURAS	xxv
RESUMEN / ABSTRACT	xxvii

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1	CONTAMINACIÓN DEL AGUA	1
1.2	JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	1
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.4	HIPÓTESIS GENERAL	2
1.5	HIPÓTESIS PARTICULAR	2
1.6	OBJETIVOS	2
1.7	ALCANCES	3

CAPÍTULO 2 ENTORNO Y FUNDAMENTOS

2.1	FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE AGUA	4
2.1.1	Fuentes municipales	4
2.1.2	Fuentes industriales	4
2.2	CLASES DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES	5
2.2.1	Definición de agua residual	5
2.2.2	Medición de los contaminantes	5
2.3	SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	8
2.4	SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL	



	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	12
2.5	CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES	15
2.5.1	Sistemas de plantas de libre flotación	15
2.5.2	Sistemas de plantas submergentes	16
2.5.3	Sistemas de plantas emergentes	17
2.5.3.1	Humedales de flujo libre superficial (HFLS)	17
2.5.3.2	Humedales de flujo sub-superficial (HFS)	17
2.5.3.2.1	Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)	18
2.5.3.2.2	Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)	18
2.6	CONSTITUYENTES PRINCIPALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HAFS) FLUJO VERTICAL (FV) Y FLUJO HORIZONTAL (FH)	19
2.6.1	Constituyentes principales de un HAFV	19
2.6.1.1	La alimentación del agua residual	20
2.6.1.2	La función del lecho o medio de soporte	21
2.6.1.3	La importancia de las plantas vasculares	21
2.6.1.4	El papel de los microorganismos	22
2.6.2	Constituyentes principales de un HAFH	22
2.6.2.1	Zona de alimentación del influente	23
2.6.2.2	El medio de soporte	24
2.6.2.3	Las plantas	26
2.6.2.4	Los microorganismos	28
2.6.2.5	Zona de salida del efluente	28

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1	SISTEMAS EN ESTUDIO	30
3.1.1	Zona Cultural de la Ciudad Universitaria	30
3.1.2	Viveros de Coyoacán	34
3.2	PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	37
3.2.1	Demanda química de oxígeno	37



3.2.2	Oxígeno disuelto	38
3.2.3	Conductividad eléctrica	38
3.2.4	Sólidos disueltos totales	38
3.2.5	Valor de pH	39
3.3	PARÁMETROS FÍSICOS	39
3.3.1	Sólidos sedimentables	39
3.3.2	Temperatura	39
3.4	MANTENIMIENTO FÍSICO DEL SISTEMA	40
3.5	CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN	40
3.5.1	Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo vertical descendente, HAFVD	40
3.5.2	Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo horizontal, HAFH	44
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1	RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL HAFVD	51
4.1.1	Valores de pH en el HAFVD	51
4.1.2	Temperaturas en el HAFVD	52
4.1.3	Conductividades eléctricas en el HAFVD	54
4.1.4	Sólidos disueltos totales en el HAFVD	55
4.1.5	Oxígeno disuelto en el HAFVD	55
4.1.6	Demanda química de oxígeno total en el HAFVD	57
4.2	RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL HAFH	59
4.2.1	Valores de pH en el HAFH	60
4.2.2	Temperaturas en el HAFH	61
4.2.3	Conductividades eléctricas en el HAFH	62
4.2.4	Sólidos disueltos totales en el HAFH	63
4.2.5	Oxígeno disuelto en el HAFH	64
4.2.6	Demanda química de oxígeno total en el HAFH	65
4.3	Otros resultados importantes	68



CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	SISTEMA HAFVD	74
5.1.1	Conclusiones	74
5.1.2	Recomendaciones	75
5.2	SISTEMA HAFH	77
5.2.1	Conclusiones	77
5.2.2	Recomendaciones	79
5.3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	80
ANEXOS		83
A.1	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LA PLANTA PILOTO TIPO HAFVD	84
A.2	PLANO GENERAL DE UBICACIÓN DEL HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL DESCENDENTE	85
A.3	HOJA DE DATOS PARA LA BOMBA, TOMADA DE LOS DATOS PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR (DN = 1 ½, rpm= 3450, POTENCIA = ½ HP)	86
A.4	HOJA DE DATOS PARA LA GEOMEMBRANA DE PPE, TOMADA DE LOS DATOS PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR	87
A.5	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LA PLANTA PILOTO TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL	88
A.6	PLANO GENERAL DE UBICACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL	89
A.7	ESQUEMA DE FLUJO DEL RÍO MAGDALENA DESDE SU NACIMIENTO EN EL AJUSCO	89
A.8	INTERVALO DE VALORES FISICOQUÍMICOS PRESENTES EN EL RÍO MAGDALENA	90
A.9	HOJA DE DATOS DE LA FOSA SÉPTICA DEL HAFH	91
A.10	HOJA DE DATOS DE LA BOMBA SUMERGIBLE DEL HAFH	92
A.11	TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL, DQO ₁	93
A.12	TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES, SS	95
A.13	TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE pH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, OXÍGENO DISUELTUO, SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES USANDO UN EQUIPO DE CAMPO	97
A.14	PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO ₁	101



A.15	CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DQO _t USADAS DURANTE EL PERIODO EXPERIMENTAL	103
A.16	AGENTES POTENCIALMENTE INFECCIOSOS PRESENTES EN EL AGUA RESIDUAL	104
A.17	DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA EL HAFVD	106
A.17.1	Valor de pH	106
A.17.2	Temperatura (°C)	107
A.17.3	Conductividad eléctrica en (micro mho/cm)	108
A.17.4	Sólidos disueltos totales, SDT (mg/L)	109
A.17.5	Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)	110
A.17.6	Demanda química de oxígeno total, DQO _{tot} (mg/L)	111
A.17.7	Porcentajes de remoción de DQO _t en el HAFVD	112
A.18	DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA EL HAFH	113
A.18.1	Valor de pH	113
A.18.2	Temperatura (°C)	114
A.18.3	Conductividad eléctrica en (micro mho/cm)	115
A.18.4	Sólidos disueltos totales, SDT (mg/L)	116
A.18.5	Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)	117
A.18.6	Demanda química de oxígeno total, DQO _{tot} (mg/L)	118
A.19	MANEJO, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN	119
A.19.1	RESIDUOS GENERADOS DURANTE LA FASE ANALÍTICA	119
A.19.2	RESIDUOS GENERADOS EN LOS SISTEMAS EN ESTUDIO	120
A.20	TRATAMIENTO DE RESIDUOS GENERADOS POR LA TÉCNICA DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL	122
A.21	MANUAL PARA LAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES	125
A.22	Tablas que presentan los requerimientos de las NOM-001-SEMARNAT-1997 y NOM-003-SEMARNAT-1997	158
REFERENCIAS		160
REFERENCIAS CONSULTADAS (SIN CITAR EN EL TEXTO)		167

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag
2.1 Tratamiento en una planta convencional de agua residual doméstica sin considerar la estabilización y disposición de natas y sólidos del pretratamiento y de gases y aerosoles generados en el proceso (Jiménez-Cisneros, 2001)	9
2.2 Plantas acuáticas comunes (Metcalf y Eddy, 1991)	11
2.3 Proceso de depuración efectuado en los humedales artificiales (Lara-Borrero, 1999)	12
2.4 Esquema general de un humedal artificial de flujo vertical (Cooper, 1993)	20
2.5 Esquema general de un humedal artificial de flujo horizontal (Cooper, 1993)	23
3.1 Vista frontal del HAFVD	31
3.2 Vista lateral del HAFVD	31
3.3 Incremento de la densidad de plantas (carrizos) en el HAFVD	31
3.4 Mantenimiento y reacomodo de la tubería de irrigación en el HAFVD	32
3.5 Adaptación de los nuevos carrizos en el HAFVD	32
3.6 Vista de la modificación a la tubería	32
3.7 Vista de la modificación a la tubería en dirección al tanque homogenizador	32
3.8 Vista general de la modificación realizada en la tubería proveniente de los edificios	32
3.9 Plaga de chapulines en el HAFVD	33
3.10 Vista de las hojas de los tules siendo consumidos por los chapulines	33
3.11 HAFVD en el periodo de operación vista de frente	33
3.12 HAFVD en el periodo de operación vista lateral	33
3.13 Vista general de la poda parcial en el humedal	34
3.14 Labores de purga de lodos en el sedimentador	34
3.15 Arreglo del flotador interruptor vertical dentro de la cisterna	35
3.16 Detalle de las paredes sin construir en el registro del sedimentador	35



3.17	Construcción de paredes dentro del registro del sedimentador	35
3.18	Vista general de la cerca en el humedal	36
3.19	Nivel del agua residual alcanzado durante la inundación dentro del humedal	36
3.20	Labores correctivas para minimizar el impacto dentro del humedal	36
3.21	Detalles de los perfiles en el HAFVD	41
3.22	Paredes de concreto del HAFVD	41
3.23	Recubrimiento de PPE en las paredes del HAFVD	41
3.24	Sedimentador primario del HAFVD (fosa séptica)	42
3.25	Tanque homogenizador o segundo sedimentador del HAFVD	42
3.26	Electro-bomba autocebante del HAFVD	42
3.27	Esquematación de la salida del HAFVD	43
3.28	Detalle lateral de la obra civil para el humedal artificial de flujo horizontal (Ramírez-Carrillo, 1998)	46
4.1	Comportamiento del pH en el HAFVD	52
4.2	Comportamiento de la temperatura en el HAFVD	53
4.3	Comportamiento de la conductividad eléctrica en el HAFVD	54
4.4	Comportamiento de los sólidos disueltos totales en el HAFVD	55
4.5	Comportamiento del oxígeno disuelto, OD, en el HAFVD	56
4.6	Comportamiento de la Demanda química de oxígeno total en el HAFVD	57
4.7	Eficiencias de depuración durante el periodo experimental en el HAFVD	59
4.8	Comportamiento del pH en el HAFH	61
4.9	Comportamiento de la temperatura [°C] en el HAFH	62
4.10	Comportamiento de la conductividad eléctrica [$\mu\text{mho/cm}$] en el HAFH	63
4.11	Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el HAFH	64
4.12	Comportamiento del oxígeno disuelto [$\text{mg de O}_2/\text{L}$] en el HAFH	65
4.13	Comportamiento de la demanda química de oxígeno total en el HAFH	66
4.14	Eficiencias de depuración en el periodo experimental en el HAFH	68
A.5	Diagrama de flujo de proceso para el humedal artificial de flujo	



	horizontal	88
A.12.1	Equipo usado en la determinación de sólidos sedimentables	95
A.12.2	Realización de la técnica de sólidos sedimentables	95
A.12.3	Precipitación de sólidos en el cono Imhoff	96
A.12.4	Vista general de la técnica de sólidos sedimentables	96
A.12.5	Precipitación de sólidos después de 15 segundos	96
A.13.1	Equipo de muestreo en campo utilizado para tomar lecturas de los parámetros fisicoquímicos	97
A.13.2	Equipo HACH usado para medir el oxígeno disuelto	100
A.14.1	Preparación de muestras para su digestión	102
A.14.2	Muestras después de la digestión	102
A.16.1	Microfotografía de la bacteria <i>E. coli</i> (Metcalf y Eddy, 1991)	105

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



ÍNDICE DE TABLAS

	Pag
2.1 Principales microorganismos que provocan enfermedades debido al consumo de agua contaminada (Jiménez-Cisneros, 2001)	6
2.2 Operaciones unitarias que se emplean para el tratamiento del agua (Jiménez-Cisneros, 2001)	10
2.3 Niveles de tratamiento (Jiménez-Cisneros, 2001)	11
2.4 Materiales de soporte más usuales en humedales artificiales, su permeabilidad y conductividad hidráulica promedio (Netter, 1990)	25
2.5 Capacidad de fijación de nitrógeno y fósforo de tres de las especies más comunes de macrofitas en HAFH (Ramírez-Carrillo, 1998)	26
2.6 Características de algunas de las plantas vasculares empleadas en los humedales (Ramírez-Carrillo, 1998)	27
2.7 Clasificación de los microorganismos por la fuente de energía y carbono en los HA (Ramírez-Carrillo, 1998)	28
3.1 Condiciones de operación del HAFH	44
4.1a Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFH	48
4.1b Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFVD	49
4.2 Límites establecidos por la normatividad mexicana para aguas tratadas (NOM-003-SEMARNAT-1997) comparados con los resultados obtenidos para los reactores en estudio en las dos plantas prototipo (Durán-de-Bazúa y col., 2002)	69
4.3a Determinación de coliformes en el HAFVD, NMP/100mL de agua (Guzmán-Aguirre, 2003)	70
4.3b Determinación de coliformes en el HAFH, NMP/100mL de agua (Guzmán-Aguirre, 2003)	70
4.4a Determinación de <i>Salmonella sp.</i> en el HAFVD (Guzmán-Aguirre, 2003)	71
4.4b Determinación de <i>Salmonella sp.</i> en el HAFH (Guzmán-Aguirre, 2003)	71



4.5	Comparación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en el HAFVD y las Normas Mexicanas	72
4.6	Comparación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en el HAFH y las Normas Mexicanas	73
A.14.1	Cantidades de solución estándar madre y agua destilada utilizadas para la elaboración de la curva de calibración	101
A.15.1	Curvas de calibración y ecuaciones de regresión	103
A.16.1	Agentes potencialmente infecciosos presentes en el agua residual doméstica (Metcalf y Eddy, 1991)	104
A.17.1	Valor de pH	106
A.17.2	Temperatura (°C)	107
A.17.3	Conductividad eléctrica en (micro mho/cm)	108
A.17.4	SDT (mg/L)	109
A.17.5	Oxígeno disuelto (mg/L)	110
A.17.6	Demanda química de oxígeno total, DQO _{tot} (mg/L)	111
A.17.7	Porcentajes de remoción del HAFVD	112
A.18.1	Valor de pH	113
A.18.2	Temperatura (°C)	114
A.18.3	Conductividad eléctrica en (micro mho/cm)	115
A.18.4	SDT (mg/L)	116
A.18.5	Oxígeno disuelto (mg/L)	117
A.18.6	Demanda química de oxígeno total, DQO _{tot} (mg/L)	118
A.19.1	Generación de residuos por el método estándar de reflujos cerrados en la determinación de la demanda química de oxígeno por muestra unitaria	119
A.22.1	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (NOM-001-SEMARNAT-1997)	158
A.22.2	Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997)	159

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



GLOSARIO

Afluente: Arroyo o río secundario que desemboca o desagua en otro principal (del latín *affluens*, *affluentis*), por consecuencia, una corriente secundaria que entra a engrosar una corriente principal en un proceso. Erróneamente, algunos textos usan este término por influente.

Antibiosis: Acción de algunos organismos de liberar sustancias que inhiben o matan a los organismos patógenos.

Anóxico: Ambiente carente de oxígeno.

Composta: Conocido también como "compost" (del latín *compositus*, "compuesto"), abono de gran calidad obtenido a partir de la descomposición de residuos orgánicos, que se utiliza para fertilizar y acondicionar los suelos, mejorando su calidad. Al mezclarse con la tierra la vivifica y favorece al desarrollo de las características óptimas para el cultivo. Para la fabricación de composta – el llamado "compostaje" – , los residuos se mezclan con cal y tierra y se colocan en capas. Las bacterias y otros organismos del suelo forman humus mediante la descomposición de los residuos. La formación del humus se ve fomentada por una buena ventilación, un removido frecuente y un grado de humedad suficiente.

Conductividad eléctrica: La conductividad de los materiales es generalmente medida por el paso de una corriente conocida y voltaje constante a través de un volumen conocido del material y determinando su resistencia en ohms. La conductividad total es entonces calculada simplemente tomando el recíproco de la resistividad total (se mide en mho cm^{-1} o Siemens m^{-1}).

Conductividad hidráulica: La conductividad hidráulica o permeabilidad del sustrato, es la resistencia del medio o sustrato a un flujo a través del mismo, la resistencia es impuesta por las características geológicas del sustrato, así como la forma de las partículas que lo componen.



Cianofíceas: Algas verde-azuladas, nombre que reciben los miembros de un filo de organismos unicelulares fotosintéticos que carecen de núcleo definido u otras estructuras celulares especializadas; se conocen también como cianofitos, cianobacterias o bacterias verde-azuladas.

Cladóforas: Género de algas verdes que se adhieren y crecen en las rocas o maderas sumergidas en lagos poco profundos y arroyos; son especies marinas, de apariencia gruesa con filamentos regulares ramificados, separados por segmentos de paredes multinucleares. Las cladóforas crecen en forma de racimos o esferas que tienen una longitud de alrededor de 13 centímetros.

Coliforme: Microorganismo que usualmente se encuentra en el tracto intestinal de animales mamíferos, incluyendo al humano. Los microorganismos coliformes son utilizados como indicadores de calidad del agua, más precisamente como evidencia de contaminación por heces fecales humanas en agua de suministro.

Demanda bioquímica de oxígeno: Indicador del contenido de contaminantes de un efluente expresado por el consumo de oxígeno disuelto por parte de microorganismos que descomponen esos contaminantes, generalmente materia orgánica presente en el propio efluente. Se parte para ello, de la capacidad autodepurativa del agua, conferida por los propios microorganismos. La DBO se mide como la masa (en miligramos) de oxígeno utilizado para degradar los contaminantes contenidos en un litro de muestra de agua incubada a 20°C durante un periodo de cinco días o por un lapso indefinido hasta que ya no hay más consumo de oxígeno (DBO₅ o DBO *última*).

Demanda química de oxígeno total: Es la medición indirecta de la materia orgánica e inorgánica presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada en un medio ácido por un fuerte oxidante como el permanganato o el dicromato de potasio expuesta a una temperatura entre 150 y 200 °C. Se le adicionan algunos reactivos para eliminar los iones inorgánicos y medir solamente el contenido de material orgánico y para acelerar la reacción de oxidación (sulfatos de plata y mercurio).



DGCOH: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Dependencia del Gobierno del Distrito Federal encargada de las operaciones y construcciones hidráulicas en esta entidad federativa. Actualmente se denomina Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Efluente: Descargas contaminantes al ambiente parcial o totalmente tratados o en su estado natural provenientes de alguna actividad humana (del latín *fluere*, fluir y el prefijo *e*, hacia fuera).

Humedal: Las zonas pantanosas, marismas y turberas, conocidas con el nombre colectivo de humedales, son ecosistemas en la frontera entre agua y tierra. Independientemente de su vegetación, cada humedal se encuentra sobre un sustrato que está saturado de agua, al menos parte del año. Los humedales se encuentran en todos los tipos de regiones de vegetación natural, aunque la mayor parte de ellos son demasiado pequeños para estar representados en los mapas a pequeña escala. Generalmente se reconocen cinco clases principales de humedales: Marinos, humedales costeros, incluyendo costas rocosas y arrecifes de coral; estuarios, como los deltas, marismas de marea y pantanos de manglar; lacustres, como los lagos y lagunas; ribereños, como los humedales asociados a ríos y arroyos y palustres, como los lodazales o ciénagas, marismas y pantanos.

Humedal artificial o construido, HA: Otro grupo es el de los construidos por el ser humano, como estanques, embalses, graveras abandonadas, azudes, canales y acequias que, por la flora y la fauna que sustentan también merecen ser considerados como humedales. Un claro ejemplo lo constituyen las graveras abandonadas en zonas próximas a los ríos en donde el nivel freático ha permitido la inundación del vaso de la explotación y que se convierten en importantes zonas de invernación o de cría de especies acuáticas. Las interacciones de los componentes físicos, biológicos y químicos de un humedal, tales como suelos, agua, plantas y animales, posibilitan a estos ecosistemas el realizar las siguientes funciones: Almacenamiento de agua, protección contra tormentas y mitigación de inundaciones, estabilización de la línea de costa y



control de la erosión, así como de las condiciones climáticas locales, recarga y descarga de acuíferos subterráneos, purificación del agua, retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes.

Influente: Río de las regiones secas que pierde agua por evaporación. Entrada de fluido a un sistema hecho por el hombre (del latín *fluere*, fluir y el prefijo *in*, hacia dentro).

Macrófitas o macrofitas: Plantas o vegetales, en este caso para la investigación conducente son de tipo acuático, sean flotantes, emergentes y subemergentes.

Mineralización: Comunicar una sustancia [a otra], en el seno de la tierra, las condiciones de mineral: el azufre mineraliza el hierro. Condición de transformar sustancias complejas en compuestos relativamente más simples. (por ejemplo, transformar proteínas, carbohidratos, etc., a agua, CO₂, H₂S, etc.).

pH: Potencial de Hidrógeno. Es el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno (H⁺) en una solución. Sirve para describir si una solución es ácida o alcalina en una escala de 1 a 14, alcalinas o básicas. Solamente un agua neutra, es decir, ni ácida ni básica, tiene un pH de 7 a 24°C.

Rizoma: Tallo carnoso que crece horizontalmente debajo de la superficie del suelo y actúa como órgano de acumulación de nutrientes que permite a la planta perpetuarse. Los rizomas no son raíces, cuya función es absorber nutrientes, sino que emiten raíces por la cara inferior y tallos por la superior. A diferencia de las raíces verdaderas, los rizomas tienen nudos, yemas y hojas diminutas y no mueren cuando se cortan; si se replantan, dan lugar a una planta nueva.

Rizosfera: Lorenz Hiltener introdujo en 1904 el término rizosfera, que designaba el volumen de suelo que rodea a las raíces y que resulta afectado por el desarrollo de éstas.



Sólidos en suspensión: Pequeñísimas partículas de contaminantes en el agua, que contribuyen a su turbidez y que son difíciles de eliminar por métodos convencionales.

Sólidos sedimentables: Materiales relativamente finos con densidades mayores que la del agua, que pueden ser separados de esta, dejando que se asienten por acción de la gravedad. Es la materia que queda en el fondo de un recipiente después de sedimentar un litro de solución en un tiempo de 30 minutos.

Sólidos totales disueltos: La cantidad total de materiales orgánicos e inorgánicos disueltos en el agua. Una cantidad excesiva de sólidos disueltos en agua la inhabilitan para consumo humano y para usos industriales que requieren de aguas "blandas".

Sustrato: Material inerte de soporte usado para sustituir al suelo en los humedales artificiales.

Tiempo de residencia hidráulica: Es el periodo necesario para remover los contaminantes y la materia orgánica presente en el agua residual, el tiempo de residencia hidráulico en los humedales artificiales de flujo horizontal es calculado por la siguiente expresión:

$$t = \frac{L * W * y * n}{Q}$$

Donde: L: Largo del humedal, m
W: Ancho del humedal, m
y: Profundidad del lecho en el humedal, m
n: Porosidad del lecho o sustrato, expresado como decimal
Q: Caudal a través del humedal, m³/d

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tiempo de retención celular: El tiempo de retención celular en un reactor biológico resulta igual que el tiempo de residencia hidráulico, cuando no se controla la "edad" la biomasa responsable de los procesos biológicos, por lo que depende de la biomasa presente en el agua residual influente y la tasa de reproducción por ejemplo un cultivo estático o cerrado en que no se añaden mas sustancias nutritivas o biomasa ni se



extraen productos intermedios, o bien un sistema de flujo continuo completamente mezclado sin recirculación de sólidos. En estos procesos sin retención de biomasa la calidad de biomasa acumulada en el reactor depende de la concentración del sustrato en el influente, para aguas residuales diluidas se desarrolla una pequeña cantidad de biomasa por lo que crece la necesidad de retener biomasa en el sistema si se quiere incrementar la capacidad de tratamiento. Dos formas utilizadas en sistemas biológicos para retención de biomasa corresponde al proceso físico de sedimentación y al proceso biológico de formación de biopelícula.

TFESIS CON
FALLA DE ORIGEN



LISTA DE ABREVIATURAS y NOMENCLATURA

A_s	Área superficial del humedal, m
CE	Conductividad eléctrica, mmho cm ⁻¹ , dS m ⁻¹
C_e	Concentración del contaminante en el efluente, mg/L
C_o	Concentración del contaminante en el influente, mg/L
D₁₀	Tamaño efectivo del material del lecho de soporte, mm
DBO₅	Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, mg/L
DGSCA	Dirección General de Servicios de Cómputo Académico. UNAM
DGCOH	Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal. Actualmente Sistemas de Aguas de la Ciudad de México
DQO_t	Demanda química de oxígeno total (disuelta y suspendida)
E	Valor de DQO _t del influente al humedal
FAS	Sulfato ferroso amoniacal, por sus siglas en inglés
FH	Flujo horizontal
FV	Flujo vertical
HA	Humedales artificiales o construidos
HFLS	Humedales de flujo libre superficial
HAFH	Humedal artificial de flujo horizontal
HFS	Humedales de flujo sub-superficial
HAFVD	Humedal artificial de flujo vertical descendente
k_s	Conductividad hidráulica, m ³ /m ² ·d
K_T	Constante de reacción de primer orden que depende de la temperatura, d ⁻¹
K₂₀	Constante de reacción de primer orden que depende de la temperatura y que, en este caso, está a 20°C, d ⁻¹
L	Largo de la celda del humedal [m]
n	Porosidad o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal
PIQA y QA	Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la UNAM



pH	Potencial de Hidrógeno
Q	Caudal medio a través del humedal [m^3/d]
Q_o	Caudal de salida [m^3/d]
Q_e	Caudal de entrada [m^3/d]
QA	Químico en Alimentos
S	Valor de DQO ₁ del efluente del humedal
SDT	Sólidos disueltos totales, mg/L
Ss	Sólidos en suspensión, mg/L
SS	Sólidos sedimentables, mg/L
TRC	Tiempo de retención celular [d]
TRH = t	Tiempo de residencia hidráulica [d]
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana
W	Ancho de la celda del humedal [m]
y	Profundidad de la celda del humedal [m]

Símbolos griegos

η	Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno total
--------------------------	---

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



RESUMEN

Los humedales artificiales representan una alternativa viable como sistemas en la depuración de aguas residuales del tipo domésticas y en algunos casos en la depuración de aguas residuales de origen industrial, principalmente en zonas de difícil acceso así como también en lugares en donde no se cuenta con obras de conexión ó colectores principales. Las investigaciones sobre estos sistemas en México son muy escasas y dado que han sido estudiados principalmente en países con climas fríos, se considera importante continuar con las investigaciones realizadas por el PIQA y QA de la UNAM desde 1989. El presente trabajo se enfoca en el comportamiento que presentan estos sistemas a las condiciones climáticas imperantes en el sur del Distrito Federal. El estudio se realizó específicamente en las plantas prototipo de humedales artificiales (HA) que tiene la UNAM, un humedal artificial de flujo vertical descendente (HAFVD) alimentado con aguas residuales de tipo domésticas con 15 m² de área superficial y otro humedal artificial de flujo horizontal (HAFH), alimentado con aguas residuales de tipo mixto con 75 m² de área superficial. La evaluación de estos sistemas se efectuó durante un periodo de funcionamiento continuo de diez meses. Durante este lapso se establecieron los periodos de estabilización para cada sistema. Con los problemas típicos que se presentaron se actualizó el manual de mantenimiento y operación para ambos. No existe la intención de comparar ambos sistemas, ya que el HAFVD está localizado en la Ciudad Universitaria y recibe aguas residuales de un área administrativa, mientras que el HAFH está ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán y recibe aguas residuales del río Magdalena (contaminado a lo largo de su cauce con aguas residuales urbanas e industriales). Con objeto de establecer los periodos de estabilización se manejaron dos flujos distintos para cada sistema. En el HAFVD los flujos de alimentación fueron de 0.45 y de 0.4 m³/d para el primero y el segundo flujos, respectivamente, con tiempos de residencia estimados de 4.8 y 5.4 días, respectivamente. En el HAFH, el primer flujo fue de 10.52 m³/d con un tiempo de residencia estimado de 2.7 días y el segundo flujo de alimentación fue de 5.37 m³/d con un tiempo de residencia de 5.3 días. Se observó que en el HAFVD alcanza la estabilidad con mayor facilidad a pesar de las grandes variaciones de carga orgánica medida como demanda química de oxígeno total (DQO_t) del influente. Esto se aprecia ya que no



presenta grandes perturbaciones en el efluente, manteniendo una buena eficiencia depurativa, alrededor de 80%. En el periodo de evaluación se obtuvieron resultados que ayudaron a establecer que tanto las plantas como los microorganismos depuradores necesitan de 3 a 4 semanas para adaptarse a un cambio de concentración en el influente. En el HAFH no es posible alcanzar una estabilidad tan rápidamente como en el sistema anterior, debido a la cantidad variable de contaminantes presentes en el influente durante todo el tiempo de evaluación. En este sistema no fue posible determinar el tiempo de adaptación de las plantas y microorganismos a las nuevas condiciones en el cambio de concentración del influente. También se verificó mediante los dos flujos evaluados que, al disminuir el flujo de alimentación al sistema, aumenta la capacidad depurativa de los sistemas medida como demanda química de oxígeno total (DQO_t), pero esto requerirá mayores áreas (mayor tiempo de residencia hidráulica). Este comportamiento es más evidente en el HAFH ya que la depuración alcanzada durante el funcionamiento del sistema con el primer flujo (10.52 m³/d) fue del 45.3% y, al disminuir el flujo de alimentación a 5.37 m³/día, la depuración en el sistema alcanzó 59.3%. Ambos sistemas cumplen con la normatividad vigente para aguas residuales tratadas usadas para riego.

TFESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La mayor parte de las actividades económicas requiere de la utilización y explotación de los recursos naturales, invariablemente dejando una profunda huella en los ecosistemas del mundo. Uno de esos recursos naturales y el más importante para la vida es el agua. Es una realidad que, en los últimos años, se ha acentuado la contaminación de los cuerpos de agua a causa principalmente, del manejo inadecuado de las descargas de origen industrial y urbano.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

Los humedales artificiales (HA) son una ecotecnología viable para la depuración de aguas residuales, especialmente en lugares donde no se disponen de sistemas convencionales de tratamiento de aguas de uso municipal. Estos sistemas han sido estudiados principalmente en países con climas bastante fríos, por lo que resulta conveniente estudiar ampliamente estos sistemas en las condiciones locales y analizar sus comportamientos con la mira de usarlos de manera más efectiva.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Proyecto "Humedales Artificiales" del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQA y QA), está enfocado a resolver la problemática derivada de la generación de aguas residuales en comunidades pequeñas y medianas del país, que cuando son vertidas sin tratamiento, afectan el ambiente. En este sentido, se ha optado por la elección de sistemas biológicos que simulen los medios naturales de autodepuración capaces de eliminar las sustancias que contaminan el agua. Este tipo de tecnologías, representa un modelo no convencional para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ya que la mayor experiencia con humedales artificiales se tiene en países de climas fríos como Alemania, Inglaterra, Austria, Canadá, entre otros. En México no se cuenta con la información necesaria sobre el comportamiento de estos sistemas, debido a que hay pocas investigaciones por lo que el presente trabajo está enfocado al comportamiento de estos sistemas durante un periodo de tiempo establecido.

Para efectos de claridad en este documento y evitar en la medida de lo posible confusiones en el desarrollo del mismo, los autores se refieren como **sistema** a la planta de tratamiento de aguas residuales que emplean humedales artificiales y como **plantas** a los vegetales o macrófitas que están involucradas en el sistema de tratamiento.

1.4 HIPÓTESIS GENERAL

Debido a que los sistemas son biológicos se espera que, al introducir una perturbación con respecto al flujo de entrada o la composición, el tiempo de respuesta no será inmediato pero que finalmente se alcanzará la meta propuesta con esa perturbación.

1.5 HIPÓTESIS PARTICULAR

Utilizando dos diferentes flujos volumétricos y auxiliados con los parámetros fisicoquímicos se obtendrá después del tiempo de adaptación de las plantas vasculares y microorganismos la respuesta del sistema para cada uno permitiendo definir la estrategia para mejorar la eficiencia depurativa de los sistemas.

1.6 OBJETIVOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los objetivos de esta fase de la investigación son los siguientes:

- Reacondicionar y estabilizar dos sistemas de tratamiento de aguas residuales a escala prototipo que emplean el principio de los humedales artificiales, HA.



- Evaluar el funcionamiento de los dos HA a escala prototipo una vez estabilizados, en términos de las principales variables físicas y fisicoquímicas, a condiciones de operación definidas.
- Identificar los pasos críticos de los sistemas durante la puesta en marcha y el periodo dinámico o de estabilización, para actualizar los manuales de arranque, operación y mantenimiento de los sistemas, elaborados cuando estos sistemas se construyeron.

1.7 ALCANCES

El alcance de este trabajo es el de reacondicionar dos plantas prototipo y su posterior seguimiento, por un periodo establecido de tiempo, basados en las experiencias adquiridas con investigaciones previas sobre estos sistemas. Con los resultados obtenidos se pretende estabilizar el comportamiento de ambos humedales artificiales para que, en investigaciones futuras, se establezcan diferentes condiciones de operación, las cuales aporten resultados que ayuden en la optimización u optimización de estos sistemas. El tipo de agua residual alimentada a los dos sistemas tiene características físicas, químicas y microbiológicas distintas. Por ende, no se pretendió compararlos sino estudiar específicamente cada uno de ellos.

De las investigaciones realizadas en la UNAM, particularmente en el Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQA y QA por sus siglas), se desprende que es una ecotecnología relativamente barata comparada con otros sistemas biológicos de tratamiento de agua residual. Igualmente, se tienen niveles de depuración elevados con respecto al DBO_5 , sólidos en suspensión y una muy alta eliminación de microorganismos patógenos, así como el aporte a la estética del paisaje en donde se encuentra el humedal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO 2

ENTORNO Y FUNDAMENTOS

Un efecto alarmante de la contaminación del agua es la cantidad de niños que mueren anualmente en los países en vías de desarrollo a causa de enfermedades asociadas con la falta de agua potable, saneamiento adecuado e higiene. Otro efecto igualmente alarmante que se presenta en poblaciones del interior de estos países en vías de desarrollo o de economías emergentes es que ya se han cerrado pozos de abastecimiento de agua potable, debido a su contaminación (Coss, 2002).

2.1 FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El origen de la contaminación del agua tiene muchas fuentes. Las expuestas a continuación si bien no son todas, son algunas de las más significativas y comunes a la mayoría de las áreas o regiones.

2.1.1 Fuentes municipales

Consisten de una combinación de residuos domésticos mezclados con cantidades variables de efluentes industriales, provenientes de pequeñas industrias, servicios y comercios.

2.1.2 Fuentes industriales

Este tipo de fuente es más común en áreas muy pobladas, pero también se localiza en pequeñas comunidades y áreas aisladas, donde se instalan empresas cuando hay abundancia de agua, vías de comunicación y mano de obra barata. Debido a la gran variación que presentan en su composición no es posible proporcionar una definición general sobre la naturaleza de dichos residuos. Las variaciones en la composición y el volumen de los residuos industriales es debida a las materias primas usadas, los



procesos y los productos finales. Algunas fuentes de aguas residuales industriales tienen su origen en:

1. La elaboración de productos intermedios o finales para ser comercializados.
2. Los desechos generados en la limpieza de equipos industriales.
3. Contaminantes que escapan de los cúmulos de desechos industriales sólidos.

Existen otras fuentes que son denominadas fuentes no puntuales y son aquellas de naturaleza difusa y que descargan sustancias contaminantes sobre amplias zonas de terrenos. Algunas de estas fuentes son las actividades agrícolas, silvícolas, constructivas y las de extracción de minerales.

2.2 CLASES DE CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES

2.2.1 Definición de agua residual

Para efectos de la Ley de Aguas Nacionales (1995), es el resultado de la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía o inducir condiciones en el agua que, de modo indirecto o directo, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

2.2.2 Medición de los contaminantes

Actualmente, se contemplan en casi todas las legislaciones seis clases principales de contaminantes presentes en las aguas residuales de cualquier comunidad urbana del mundo, las cuales deben eliminarse antes de ser descargadas a las redes o cuerpos naturales (Tsukamoto, 2002):

1. Los organismos patógenos
2. La materia orgánica disuelta medida como DBO
3. Los sólidos suspendidos (SS)
4. Nutrientes (P y N)
5. Olor fétido (H_2S y CH_4)
6. Metales pesados



Los organismos patógenos son muy importantes ya que deterioran la salud humana y las aguas residuales actúan como dispersantes de gran parte de las enfermedades endémicas del mundo. Numerosos tipos de seres vivos, como protozoarios, bacterias, microplasmias y virus, causantes de enfermedades a los seres humanos o de sus productos metabólicos generalmente tóxicos son transportados por las aguas residuales. En la Tabla 2.1 se muestran algunos de los microorganismos los cuales provocan enfermedades debido al consumo de agua. Su cuantificación es importante para evaluar el efecto que causan cuando están en los cuerpos de agua.

Tabla 2.1. Principales microorganismos que provocan enfermedades debido al consumo de agua contaminada (Jiménez-Cisneros, 2001)

Bacterias	<i>V. cholera</i> <i>Salmonella spp</i> <i>Shigella spp</i>
Virus	Virus de la hepatitis infecciosa Coxsackie A y B (32 tipos) Reovirus (3 tipos) ECHO virus (34 tipos) Adenovirus (32 tipos) Virus de la gastroenteritis Virus de la diarrea Virus de la poliomielititis
Parásitos	<i>E. histolytica</i>
Algas	Cianofitas

En el Anexo A.16 se presenta una lista de los agentes potencialmente infecciosos presentes en las aguas residuales domésticas.

Con objeto de medir la contaminación orgánica para aguas residuales y aguas superficiales se desarrolló en Inglaterra uno de los parámetros más comúnmente usados en la ingeniería ambiental, conocido como demanda bioquímica de oxígeno



(DBO). Involucra la medición del oxígeno disuelto usado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica y se considera que es equivalente másicamente a la cantidad de materia orgánica biodegradable presente. Los resultados de la determinación de la DBO son usados para: (1) la determinación de las cantidades aproximadas de oxígeno que pueden ser requeridos para la estabilización biológica de la materia orgánica presente, (2) para medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y (3) para determinar el cumplimiento con las descargas de aguas residuales permitidas, ya que la mayor parte de las normatividades emplea este parámetro. Esta determinación de la DBO presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas cuando se emplea para medir el grado de contaminación de un cuerpo de agua, como las siguientes (Metcalf y Eddy, 1991):

1. Se requiere de bacterias sembradas y aclimatadas con una alta actividad metabólica.
2. Esta prueba solamente mide la materia biodegradable, siempre y cuando no hayan compuestos tóxicos que eliminen a las bacterias, lo que falsea los resultados.
3. Esta consideración hace necesario realizar un pretratamiento cuando se tienen en el agua en estudio residuos tóxicos.
4. La prueba no tiene validez estequiométrica después de que la materia orgánica soluble presente en la solución ha sido usada.
5. Se requiere de periodos prolongados de tiempo para obtener resultados confiables.

Por ello, en la mayor parte de los países, la DBO es solamente uno de varios parámetros para medir la cantidad de materiales disueltos en las muestras de agua en estudio (como la demanda química de oxígeno, la cantidad de carbono orgánico total, etc.), ya que su determinación única no refleja el grado de contaminación real del agua.

Otro parámetro usado en las legislaciones ambientales para medir el grado de contaminación de las aguas residuales es el conjunto de todas las partículas de tamaño suficiente como para ser vistas al "ojo desnudo" y conocidas como partículas



suspendidas, que tienen una inmensa variedad de formas, tamaños y constituyentes. Es uno de los parámetros de mayor impacto ambiental y sanitario, por englobar toda la materia orgánica e inorgánica en suspensión en las aguas residuales. Los SS incluyen organismos patógenos, materia orgánica y materia coloidal (Tsukamoto, 2002).

Considerando estos contaminantes disueltos o suspendidos (en forma global como DBO y SS), de manera más específica, los compuestos orgánicos e inorgánicos que contienen fósforo (P) y nitrógeno (N), estimulan la reproducción descontrolada de microalgas. Muchas de éstas son altamente tóxicas, envenenando el agua para uso humano y destruyendo el ecosistema. En agua dulce, las algas verde-azuladas (cianofíceas) y algunas diatomeáceas producen toxinas cancerígenas y dan un olor y sabor desagradable al agua. En el mar, las algas dinoflageladas forman la "marea roja", que provoca el envenenamiento y muerte de peces, mariscos y seres humanos. El elemento fósforo es el mayor responsable por efectos de eutrofización del ambiente y del envenenamiento del agua. Por eso, su medición para garantizar su eliminación es uno de los objetivos más importantes del tratamiento de las aguas residuales en la actualidad (Tsukamoto, 2002).

Un problema asociado con la contaminación del agua, ya mencionado arriba, es el olor. Un olor a "huevo podrido" puede ser causado por el ácido sulfhídrico, generado por bacterias anaerobias a partir de compuestos de azufre contenidos en las aguas residuales. Es un gas tóxico para las plantas, animales y seres humanos, además de ser corrosivo a las cañerías, construcciones, materiales eléctricos y electrónicos (Tsukamoto, 2002). Su medición también es importante y se han desarrollado algunos métodos analíticos para ello (Castro-González y Durán-de-Bazúa, 2002).

2.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En vista de los efectos tóxicos causados por la presencia de estos residuos, aún a bajas concentraciones, la práctica general en la actualidad es la combinación de pretratamientos o tratamientos parciales de dichos residuos antes de ser desechados. En un futuro cercano los municipios deberán otorgar servicios de tratamientos



separados para esos residuos y requerir que las industrias traten en un alto grado sus residuos para minimizar daños al ambiente como ocurre en Europa occidental (Durán-de-Bazúa, 1994). Un sistema de depuración se compone de una combinación de procesos químicos, físicos, biológicos y engloban las operaciones unitarias correspondientes que tienen por objeto reducir determinados compuestos hasta una concentración predeterminada generalmente requerida por las legislaciones ambientales vigentes. Los procesos descritos en las Tablas 2.2 y 2.3 y en la Figura 2.1 son los más comunes para el tipo de contaminante indicado, pero existen otras posibilidades cuya aplicación depende del factor económico. Además, para tener un proceso eficiente e integral (que no dañe al ecosistema) es necesario tomar en cuenta el tratamiento y la disposición de los subproductos generados (lodos y gases).

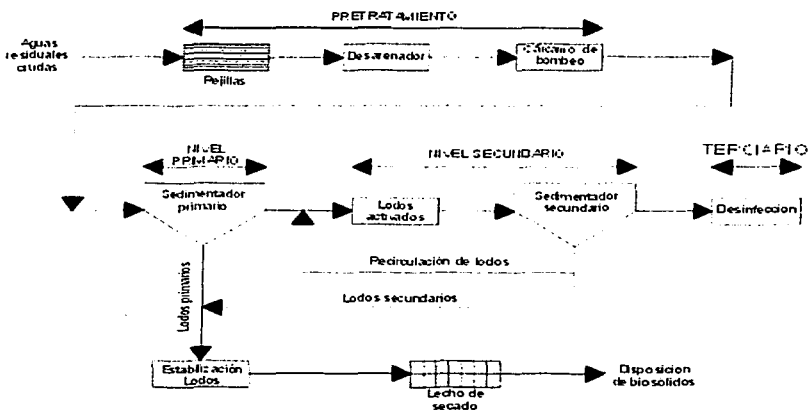


Figura 2.1. Tratamiento en una planta convencional de agua residual doméstica sin considerar la estabilización y disposición de natas y sólidos del pretratamiento y de gases y aerosoles generados en el proceso (Jiménez-Cisneros, 2001)



Tabla 2.2. Operaciones unitarias que se emplean para el tratamiento del agua (Jiménez-Cisneros, 2001)

CONTAMINANTE	PROCESO / OPERACIÓN / SISTEMA
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentación• Desarenación• Cribado y filtración• Filtración• Flotación• Coagulación-floculación
Compuestos orgánicos biodegradables	<ul style="list-style-type: none">• Sistemas biológicos aerobios / anaerobios con biomasa fija (por ejemplo, filtros sumergidos, humedales artificiales, biodiscos, etc.)• Sistemas biológicos aerobios / anaerobios con biomasa suspendida (lodos activados, lagunas, zanjas, etc)
Patógenos	<ul style="list-style-type: none">• Cloración• Ozonación• UV• Radiación• "Desinfección" solar
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none">• Nitrificación-desnitrificación biológica• Desorción• Intercambio iónico• Cloración
Fósforo	<ul style="list-style-type: none">• Precipitación• Remoción biológica y precipitación química
Compuestos orgánicos poco biodegradables (refractarios)	<ul style="list-style-type: none">• Adsorción con carbón activado• Ozonación, oxidación avanzada
Compuestos inorgánicos: Metales pesados	<ul style="list-style-type: none">• Precipitación• Intercambio iónico
Compuestos inorgánicos disueltos poco biodegradables (refractarios)	<ul style="list-style-type: none">• Procesos de membrana• Intercambio iónico



Tabla 2.3. Niveles de tratamiento (Jiménez-Cisneros, 2001)

ETAPA	PROCESO
Pretratamiento	<ul style="list-style-type: none">• Cribado• Flotación• Desarenación• Remoción de detergentes
Primario	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentación• Reoxigenación• Coagulación – floculación
Secundario	<ul style="list-style-type: none">• Procesos biológico
Terciario / avanzado	<ul style="list-style-type: none">• Filtración• Remoción de N y P• Remoción de sustancias no biodegradables
Complementario	<ul style="list-style-type: none">• Desinfección

Dentro de ellos destaca uno que ha cobrado interés en el mundo, el de humedales artificiales. A pesar de que las macrofitas acuáticas son consideradas por varios expertos como una plaga a causa de su rápido crecimiento y porque invaden lagunas, si se manejan de manera adecuada, debido a su poder de proliferación, la capacidad de absorción de nutrientes y de bioacumulación de otros compuestos del agua, las convierten en una herramienta útil en el tratamiento alterno de aguas residuales. La Figura 2.2 presenta esquemáticamente las macrofitas más comúnmente encontradas en los humedales

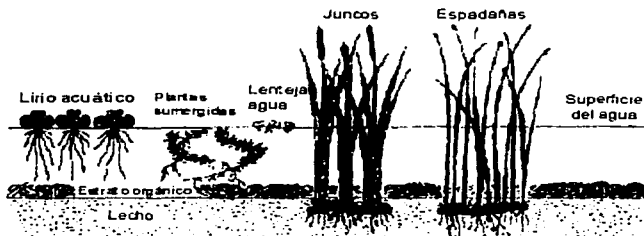


Figura 2.2. Plantas acuáticas comunes (Metcalf y Eddy, 1991)



La descripción en forma general de cómo efectúan los humedales artificiales la depuración del agua residual es mostrada en la Figura 2.3.

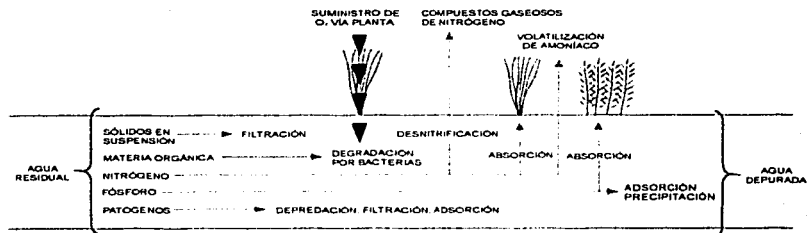


Figura 2.3. Proceso de depuración efectuado en los humedales artificiales (Lara-Borrero, 1999)

En México, las experiencias logradas con sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales a base de humedales artificiales usando macrofitas, han sido escasas, por lo que en el presente trabajo se continúa con estas investigaciones, realizando una evaluación de dos sistemas de tratamiento de agua residual, uno de flujo vertical y el otro de flujo horizontal (Durán-de-Bazúa y col., 1999).

2.4 SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El documento *Clean Water Act of the US Government*, publicado en 1986, definen a los humedales como "una superficie de suelo inundada o saturada de agua, en donde prevalece una vegetación típica adaptada a esas condiciones, en la cual es posible la existencia de mecanismos fisicoquímicos y biológicos capaces de eliminar los contaminantes que se encuentran en el agua residual" (Durán-de-Bazúa y col., 1999).

Los humedales artificiales (HA) presentan una alternativa económica como sistemas en la depuración de agua residuales de tipo domésticas y, en algunos casos, en la



depuración de aguas residuales de origen industrial: "En especial las de alimentos y agropecuarias, ya que sus contaminantes son biodegradables. Los HA enfocan su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas, vertidas por comunidades pequeñas y medianas, menores a 5 mil habitantes que no cuentan con obras de conexión a colectores principales o que no poseen suficientes recursos para implementar tecnologías más costosas" (Batchelor y Loots, 1996, Luna-Pabello y col., 1997).

La operación de los HA se basa en la actividad bioquímica de microorganismos y de plantas, los cuales están distribuidos en un lecho de material inerte a base de gravilla, arena, tezontle, escoria volcánica, piedras de río o materiales de las zonas que resulte económico y viable utilizar, para eliminar materiales disueltos y suspendidos en el agua residual. Este proceso es fundamentalmente aerobio en las áreas próximas a las raíces, aunque también sigue un comportamiento anóxico-anaerobio en las zonas más alejadas de las raíces, permitiéndose así el desarrollo de una gran variedad de microorganismos depuradores, encargados de transformar los materiales orgánicos biodegradables en materiales gaseosos como el CO_2 y H_2S o en sales inorgánicas, proceso conocido como "mineralización". La importancia y trascendencia de estos sistemas radica en que son más económicos que los de tipo convencional y se pueden adaptar mejor a las condiciones geográficas de México, dado que son idóneos para hogares de difícil acceso, en los cuales, los costos de conexión al drenaje resultan muy elevados o donde el bombeo para agua de riego es una alternativa inadecuada. Además, son altamente eficientes para eliminar bacterias no deseadas y ofrecen un aspecto agradable a la vista, llegando a constituir una reserva para la vida silvestre (Durán-de-Bazúa y col., 1999).

Su desarrollo histórico puede sintetizarse en los siguientes dos párrafos (Durán-de-Bazúa y col., 1999):

"La historia registra que algunas culturas como la egipcia, china y azteca, entre otras, habían dispuesto de medios naturales que trataban las aguas residuales generadas, empleaban dispositivos a base de filtros de arena y plantas silvestres



que crecían en la zona de descarga. Uno de los primeros documentos registrados fue el escrito por McKeney, en Australia en 1904, en el describe la construcción de un sistema que remueve sólidos y materia orgánica, existentes en el agua residual, mediante un lecho de arena con plantas, las cuales poseían un rápido crecimiento y alta estabilidad a los cambios de concentración del influente. En 1953, Seidel publicó un artículo en el que discutió la posibilidad de disminuir la contaminación y azolvamiento de los sistemas de drenaje utilizando plantas acuáticas apropiadas, como la espadaña común (*Schoenoplectus lacustris*) en un medio sólido. Según Seidel, este tipo de vegetal aumentaba la eficiencia del tratamiento, puesto que ayudaba a la mineralización de la materia orgánica, incrementaba la población de microorganismos e inclusive generaba antibióticos que eliminaban bacterias no deseables, como los coliformes, *Salmonella spp* y enterococos. Seidel también demostró que el sistema era capaz de estabilizar metales pesados y compuestos con hidrocarburos, como los fenoles y sus derivados. El trabajo desarrollado por Seidel fue llevado a la práctica por varias instituciones en Europa. En los años sesenta del Siglo XX, en Alemania, Francia y Austria se construyeron los primeros sistemas a escala completa empleando diversos tipos de especies vegetales y medios de soporte. En 1967, se construyó en Holanda el primer sistema a gran escala para tratar un volumen de agua generado por 6,000 habitantes. En Alemania, a fines de los años sesenta, Seidel, con apoyo de Kickut, desarrolló una serie de investigaciones consistente en la construcción de un sistema en el que adicionó al lecho aluminio, calcio y hierro, en complemento con arena y arcilla fina. Este arreglo facilitó la precipitación de una mayor cantidad de compuestos fosfatados que se encuentran comúnmente en el agua residual, provenientes de los detergentes caseros. Adicionalmente, sembró el medio con vegetales como el carrizo (*Phragmites australis*), que aumentaron los fenómenos de la nitrificación y desnitrificación del efluente. Desde 1976 se reportan en Sudáfrica, Estados Unidos y Gran Bretaña experiencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales y, a partir de 1986, se empezaron a introducir también los sistemas artificiales de techos inundados con plantas".



"En México, se registran las primeras experiencias desde el año 1989, con investigaciones desarrolladas en la UNAM, UAM y otras instituciones del país. Actualmente, existen sistemas construidos en Oaxaca, San Luis Potosí, Nuevo León y otros estados, pero aún no se ha generalizado su implementación en un mayor número de localidades".

Debido a que en todos ellos se ha seguido la conceptualización de los reactores como cajas negras se siguen investigando sus características y los parámetros de diseño apropiados con la finalidad de adaptarlos a las características de cada zona geográfica del país, a los materiales nativos en ellas, así como a las plantas que proliferen mejor en cada microecosistema, con la meta de reducir sus costos de construcción y operación, manteniendo la calidad de los efluentes tratados para que cumplan con la normatividad y con ello, proporcionar una alternativa de solución eficiente en el tratamiento de las aguas generadas en áreas rurales y semiurbanas de México (Durán-de-Bazúa y col., 1999).

2.5 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES

Se distinguen dos tipos fundamentales de plantas de tratamiento empleando humedales: Los sistemas naturales y los artificiales. Según describen varios autores, se establece la siguiente clasificación, en relación con la forma de vida de las plantas o macrófitas (Durán-de-Bazúa y col., 1999):

1. Sistemas de plantas de libre flotación
 - lirio acuático, chichicaxtle o lentejuela o lenteja de agua, ombligo de Venus, etc.
 - maleza acuática
2. Sistemas de plantas submergentes
3. Sistemas de plantas emergentes (áreas inundadas)
 - de flujo libre superficial
 - de flujo sub-superficial (flujo vertical y flujo horizontal)



A continuación se proporciona la descripción breve sobre los principios de operación para cada uno de estos sistemas.

2.5.1 Sistemas de plantas de libre flotación

En estos sistemas, la presencia de plantas flotantes en la superficie del agua facilita la actividad fotosintética, con lo que se contribuye al aporte de cantidades significativas de oxígeno disuelto y energía al medio acuático. Este fenómeno favorece la presencia de microorganismos en el sistema radicular de las plantas, los cuales se encargan de biotransformar directamente los compuestos orgánicos disueltos presentes en el agua residual. Además, las plantas son capaces de asimilar algunos metales y materiales tóxicos. Las plantas más usuales son el lirio acuático, el chichicaxtle, planta oriunda de México, por lo que su nombre viene del Náhuatl, de *chichic*, amargo y *achtli*, semilla o pepita, conocida como lentejita amarga o lentejuela (*Lemna minor*, L.), el ombligo de Venus (Soto-Esquivel, 1997) y otras especies con raíces flotantes. Los sistemas de plantas de libre flotación han sido desarrollados para su aplicación en zonas tropicales y subtropicales. La eficiencia se afecta severamente cuando la temperatura disminuye a menos de 10°C. Adicionalmente, si no son bien operados, surgen malos olores y la presencia de insectos. Asimismo, es común la aparición de algas, que en un número excesivo, ocasionan severos problemas de operación (Brix, 1993).

2.5.2 Sistemas de plantas subemergentes

Las macrofitas acuáticas subemergentes efectúan la fotosíntesis en el tejido sumergido completamente, agotando el carbono inorgánico disuelto en el agua e incrementando el contenido de oxígeno disuelto durante los periodos de alta actividad fotosintética, esto resulta en un incremento de pH creando condiciones óptimas para la volatilización del amoníaco y la precipitación química del fósforo. Concentraciones altas de oxígeno crean condiciones favorables para la mineralización de la materia orgánica en el agua y como este tipo de plantas acuáticas tienen la habilidad de asimilar los nutrientes del agua contaminada, crecen bastante bien y durante el día mantienen el agua oxigenada. Por esta causa no pueden ser usadas en aguas residuales con altos contenidos de



materia orgánica biodegradable fácilmente, porque la descomposición microbiana de la materia orgánica crea condiciones anóxicas. El principal uso potencial de los sistemas de tratamientos de aguas residuales basados en macrofitas subemergentes es entonces el tratamiento secundario en la depuración de aguas residuales (Brix, 1993).

2.5.3 Sistemas de plantas emergentes

Estos sistemas son también conocidos como humedales de área inundada. "En estos, las raíces de las plantas se encuentran soportadas en el lecho, el cual puede estar construido con gravilla, arena, arcilla u otro material de soporte para la vegetación emergente. Estos sistemas pueden clasificarse a su vez de la siguiente forma: De flujo libre superficial y de flujo sub-superficial." A continuación se describen brevemente. (Ramírez-Carrillo, 1998).

2.5.3.1 Humedales de flujo libre superficial (HFLS)

"Los sistemas de flujo libre superficial mantienen el nivel del agua residual por encima del nivel del lecho, cubre así toda la superficie del humedal, por lo que parte de los tallos y hojas de las plantas están en contacto directo con el agua residual. Esto provoca una mayor oxigenación del medio y un aumento en la mineralización de los compuestos orgánicos, gracias a la presencia de microorganismos de tipo aerobio. En estos sistemas las plantas se encuentran soportadas en el lecho por medio de sus raíces y rizomas" (Ramírez-Carrillo, 1998).

2.5.3.2 Humedales de flujo sub-superficial (HFS)

"Cuando el influente se infiltra al interior del lecho y se pone en contacto con las raíces y rizomas de las plantas, debido a las características del arreglo, se presentan condiciones aerobias, en las zonas próximas a la rizosfera, como anaerobias en las regiones alejadas de las plantas" (Ramírez Carrillo, 1998).

Este tipo de humedales se pueden clasificar en (Durán-de-Bazúa, y col., 1999):



1. Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)
2. Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)

los cuales se describen a continuación.

2.5.3.2.1 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

En los sistema de flujo vertical se requiere de diferentes capas y tamaños de partículas en el sustratos acomodadas paralelamente, con un flujo de percolación y carga intermitente (Durán-Domínguez-de-Bazúa y col., 1998; Fenoglio-Limón, 2003). Esto permite un incremento de la oxigenación varias veces mayor que las de un sistema horizontal, durante el periodo de carga el aire es forzado a salir del medio de soporte y durante el periodo de secado el aire atmosférico es arrastrado hacia los espacios entre los poros del sustrato, incrementando con esto la oxigenación del lecho, debido a que la difusión del oxígeno es 10,000 veces más rápida en el aire que en el agua. Este diseño y régimen operacional debe proporcionar alternancias en las condiciones de oxidación y reducción en el medio de soporte, estimulando secuencialmente la nitrificación y desnitrificación así como la adsorción de fósforo (Brix, 1993).

2.5.3.2.2 Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)

En estos sistemas el influente se alimenta en forma continua por uno de los extremos del humedal, que está conformado por plantas vasculares, microorganismos y un lecho o medio filtrante. El HAFH debe tener una pendiente de 1°. El sistema de alimentación es, normalmente, un tubo horizontal perforado o una canaleta, que está montado de tal manera que facilite la infiltración por gravedad al lecho del agua residual a tratar, buscando que no se formen caminos preferenciales que reduzcan el área real de transferencia de masa y, por ende, la transformación de los contaminantes orgánicos en materiales inorgánicos como el CO₂, agua, nitratos y sulfatos (Durán de Bazúa y col., 1998; 1999).



2.6 CONSTITUYENTES PRINCIPALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HAFS) FLUJO VERTICAL (FV) Y FLUJO HORIZONTAL (FH)

2.6.1 Constituyentes principales de un HAFV

Los HAFV 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 del llamado 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 metabolismo predominantemente 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" (Fenoglio-Limón, 2000, 2003).

De este modo, aunque los HAFV tienen características en el diseño que dificultan su construcción y operación, en comparación con los HAFH tienen también una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DQO y 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 la Figura 2.4 se muestra el esquema general de un humedal artificial de flujo vertical descendente.

En términos generales, el proceso de purificación de los HAFV, como se mencionó anteriormente, consiste en la correcta combinación de cuatro características básicas de estos sistemas, las cuales se describen a continuación (Fenoglio-Limón, 2000):

1. Alimentación del agua residual
2. Lecho o medio de soporte



3. Plantas

4. Microorganismos

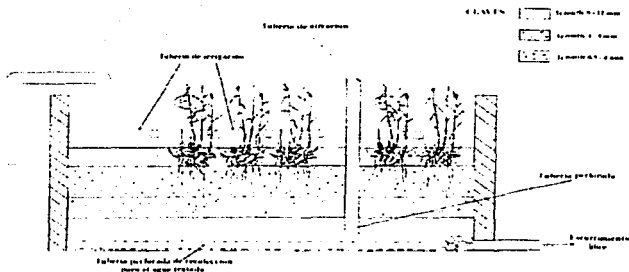


Figura 2.4. Esquema general de un humedal artificial de flujo vertical (Cooper, 1993)

2.6.1.1 La alimentación del agua residual

"En los HAFV, uno de los parámetros más importantes es el tiempo de residencia, ya que al alimentar el agua residual en forma discontinua, determina de manera indirecta la eficiencia de conversión de la materia orgánica en el reactor, a través de la difusión de oxígeno por convección" (Fenoglio-Limón, 2003). Como ya se dijo, el influente se introduce por la parte superior de toda el área superficial disponible del sistema y se infiltra por gravedad a través del lecho o medio de soporte.

Al no saturarse totalmente, debido a que el influente es alimentado de manera intermitente, el fenómeno de percolación no solamente facilita que los microorganismos y el rizoma tengan contacto con los contaminantes del agua residual sino que entre aire del ambiente al sistema.



2.6.1.2 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 lo 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, también el tiempo que la materia orgánica permanece en contacto con los microorganismos para ser degradada" (Fenoglio-Limón, 2000; 2003)

2.6.1.3 La importancia de las plantas vasculares

Las plantas vasculares sembradas en el lecho del sistema 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 (Soto-Esquivel, 2003), además de fijar otros contaminantes del agua como es el caso del nitrógeno (Brix, 1993). Esto no sería posible si el nitrógeno amoniacal (NH_4) no fuera transformado en nitratos y nitritos (NO_3 , NO_2) 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. 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 (Brix, 1987; 1994a,b). Éstas son:

- Carrizos (*Phragmites australis*)
- Tules (*Typha latifolia*)
- Juncos (*Cyperus papyrus*)

entre otras. Las 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 (Brix, 1993).

2.6.1.4 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" (Fenoglio-Limón, 2000).

2.6.2 Constituyentes principales de un HAFH

Al igual que para los humedales artificiales de flujo vertical, los constituyentes principales de los humedales artificiales de flujo horizontal son (Figura 2.5) (Durán de Bazúa y col., 1999):

1. Zona de alimentación del influente



la distribución y conducción del agua residual a través del lecho tienda a desplazarse de manera horizontal" (Durán-de-Bazúa y col., 1998; Ramírez-Carrillo, 1998).

2.6.2.2 El medio de soporte

"El medio de soporte o lecho filtrante cumple una función fundamental. Es el responsable de remover los contaminantes del agua residual mediante interacciones físicas y químicas, en conjunto con las plantas y los microorganismos contenidos en él. De manera particular, permite la retención de partículas sólidas suspendidas no removidas en los tratamientos previos, mediante diversos mecanismos. Si las aguas residuales contienen trazas de metales pesados, un elevado porcentaje de ellos es retenido mediante los fenómenos de adsorción y precipitación. En el caso de microorganismos no deseados, su eliminación toma lugar por sedimentación y filtración, principalmente. Con respecto a los compuestos que contienen nitrógeno y fósforo, su eliminación se efectúa vía adsorción del lecho, aunque por este medio el porcentaje depurativo es comparativamente menor con respecto al que realizan los microorganismos y las plantas" (Ramírez-Carrillo, 1998).

Las características del lecho (tipo y tamaño de partícula), en conjunto con la trama radicular de las plantas, conforman la hidráulica que, a su vez, determina el régimen de flujo del sistema (Tabla 2.4). "En cuanto a la composición del lecho, la bibliografía recomienda el evitar arreglos a base de arena fina y / o arcilla (con diámetros menores a 0.5 mm), debido a que son materiales fácilmente compactables e inestables, limitan la infiltración y la conductividad hidráulica del sistema" (Durán-de-Bazúa y col., 1998; Fenoglio-Limón, 2000).

La selección de los materiales de soporte depende de los siguientes factores:

- Características, distribución y tamaño de partícula.
- Conformación de la partícula, en términos de la existencia de macroporos.
- Capacidad de adsorción y absorción.
- Porosidad.



- Conductividad hidráulica.

Tabla 2.4. Materiales de soporte más usuales en humedales artificiales, su permeabilidad y conductividad promedio (Netter, 1990)

Tipo de material	Permeabilidad	Conductividad hidráulica [m^3/m^2s]
Gravilla granular fina	Alta	$10^{-3} - 1.0$
Arena granular fina	Pobre	$10^{-7} - 10^{-2}$
Caliza	Pobre	$10^{-4} - 10^{-2}$
Arenilla	Buena	$10^{-8} - 10^{-4}$
Cieno	Buena	$10^{-9} - 10^{-5}$
Arcilla	Regular	$10^{-12} - 10^{-9}$
Esquisto	Regular	$10^{-13} - 10^{-9}$

También debe tomarse en cuenta (Ramírez-Carrillo, 1998):

- Contenido de materia orgánica.
- Concentración de $CaCO_3$ libre (medido como arena fina < 2 mm).
- Grado de acidez (medido como pH).
- Absorción de fosfatos (en términos de materiales con altas concentraciones de Fe, Al y otros metales).

Los puntos expuestos anteriormente son importantes en la selección de los materiales de soporte ya que se busca que las bacterias degraden la materia orgánica presente en el agua residual. En caso de que el sustrato contenga una gran cantidad de materia orgánica la depuración en el sistema disminuirá.

La concentración de $CaCO_3$ medido como arena fina < 2 mm, en el sustrato perjudicaría la permeabilidad del mismo, provocando flujos preferenciales y con esto el tiempo de vida útil del sistema se reduciría. Una acidez alta en el sustrato evitaría el crecimiento de bacterias y plantas necesarias para el sistema de depuración. Es ideal tener un sustrato con gran capacidad de absorción de fosfatos.



2.6.2.3 Las plantas

Como ya se mencionó anteriormente, las plantas acuáticas usadas en los humedales son aquéllas conocidas como macrofitas para diferenciarlas de las microalgas y otras microfitas que también proliferan en ambientes acuáticos (Metcalf y Eddy, 1991). Incluyen a las plantas vasculares (angiospermas y helechos), musgos acuáticos y diferentes tipos de algas. Dentro de estas últimas las más usuales son las Cladóforas. La presencia de plantas es una de las características importantes que poseen los humedales. Las plantas ofrecen diversos beneficios al sistema debido al crecimiento de las raíces y los tallos (zona de la rizosfera), se facilita la presencia de microorganismos de tipo aerobio, que aumentan y agilizan la eficiencia depurativa de los compuestos orgánicos. También favorecen la capacidad de infiltración y conductividad hidráulica del medio, benefician los fenómenos de sedimentación y filtración de las partículas sólidas, reducen los riesgos de erosión por efecto de los contaminantes en el agua y limitan los riesgos por azolvamiento en el lecho (Brix, 1987). La Tabla 2.5 muestra la capacidad de fijación del nitrógeno y fósforo de algunas especies comunes de macrofitas presentes en los HA.

Tabla 2.5. Capacidad de fijación de nitrógeno y fósforo de tres de las especies más comunes de macrofitas en HAFH (Ramirez-Carrillo, 1998)

Especie	N [kg/ha]	P [kg/ha]
<i>Cyperus papyrus</i>	1220	80
<i>Typha latifolia</i>	1164	179
<i>Phragmites australis</i>	2313	162

En periodos de bajas temperaturas, las plantas sirven como un medio apto para la generación de microclimas, contribuyendo a la estabilidad operativa del humedal artificial. Esto es especialmente importante para valles altos como la Ciudad de México, donde en las noches y madrugadas, la temperatura se reduce muy considerablemente. (Durán de Bazúa y col., 1999).



Además, atenúan la penetración de la luz solar en la superficie del lecho, reduciendo el crecimiento de plantas indeseables. Complementariamente, las raíces forman una biopelícula que sirve de soporte para la adaptación de los microorganismos en condiciones aerobias, generándose así, una zona de elevada biodegradación de material orgánico. Las plantas requieren de nutrimentos para su crecimiento y reproducción. Estos los toman comúnmente a través de sus raíces y rizomas.

Tienen una limitada capacidad de retención de nutrimentos, en comparación con la cantidad que poseen normalmente las aguas residuales. Este fenómeno aumenta significativamente en la primavera y el verano, dado que en estas épocas del año los vegetales tienen una mayor capacidad reproductiva y aumentan su actividad fotosintética. Una amplia variedad de especies vegetales ha sido seleccionada para su uso en los diferentes tipos de humedales, dentro de ellas destacan las que se enlistan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Características de algunas de las plantas vasculares empleadas en los humedales (Ramírez-Carrillo, 1998)

Género – especie	Temperatura deseable [°C]	Tolerancia por máxima salinidad [mg/L]	Valor de pH óptimo	Crecimiento anual [m/ha]	Penetración de la raíz [m]
<i>Typha</i> – Tule	10 – 30	30,000	4 – 10	30	0.3 – 0.4
<i>Phragmites</i> – Carrizo	12 – 33	45,000	2 – 8	40	> 0.6
<i>Scirpus</i> – Juncos	16 – 26	20,000	5 – 7.5	20	0.6 – 0.9
<i>Schoenoplectus</i>	16 – 27	20,000	4 – 9	-	-
<i>Carex</i>	14 – 32	-	5 – 9.5	5 <	-

La planta más empleada en este tipo de tratamiento es *Phragmites australis*, conocida comúnmente como carrizo, ya que es ubicua, resistente a cambios climáticos y presenta una zona radicular extensa.



2.6.2.4 Los microorganismos

Un constituyente importante en los humedales artificiales son los microorganismos, los que gracias a su actividad metabólica remueven la mayor cantidad de materiales orgánicos. Son capaces de transformar compuestos nitrogenados, fósforo, metales pesados, algunas sustancias tóxicas y eliminar bacterias no deseables como *salmonella*, *shigella*, *E. coli*, etc. Los mecanismos depurativos más comunes son la descomposición de compuestos del carbono, depredación, amonificación, nitrificación, desnitrificación, entre otros (Tabla 2.7). Los microorganismos no deseados son eliminados por mecanismos físicos, químicos y biológicos. Los de carácter químico incluyen la oxidación, la adsorción, la exposición a toxinas generadas por las plantas y la acción de rayos ultravioleta. Dentro de los de tipo biológico se incluyen la antibiosis, la ingestión por nemátodos y protozoarios de microorganismos de menor tamaño, el ataque por bacterias y la muerte natural. En cuanto a los físicos, están la infiltración, la sedimentación, la agregación, entre otros (Ramírez-Carrillo, 1998).

Tabla 2.7. Clasificación de los microorganismos por la fuente de energía y carbono en los HA (Ramírez-Carrillo, 1998)

Clasificación	Fuente de energía	Fuente de carbono
Autótrofos:		
Fotoautótrofos	Luz solar	CO ₂
Quimioautótrofos	Reacciones inorgánicas de óxido-reducción	CO ₂
Heterótrofos:		
Fotoautótrofos	Luz solar	Carbono orgánico
Quimioautótrofos	Reacciones orgánicas de óxido-reducción	Carbono orgánico

2.6.2.5 Zona de salida del efluente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La zona de salida del efluente consta de un arreglo provisto de un tubo colector perforado, que se recubre con grava de diámetro apropiado (20 – 200 mm) para evitar



su azolvamiento. El tubo puede incluir diversos arreglos. Tiene la función de coleccionar uniformemente el efluente y de controlar y ajustar el nivel de agua en el sistema. Los diseños más comunes consisten de un tubo flexible que permite subir o bajar el nivel, dejando o no fluir el agua residual, de acuerdo con los tiempos de residencia hidráulica estimados" (Ramírez-Carrillo, 1998).

Con esta definición del entorno y los fundamentos de los sistemas de humedales artificiales, a continuación se presenta la metodología seguida en esta investigación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 SISTEMAS EN ESTUDIO

Los sistemas en estudio se diseñaron con fines científicos de investigación, por lo cual fueron construidos en lugares de propiedad federal y cuentan con corriente eléctrica, equipos electromecánicos y recubrimientos de polipropileno reforzado (PPE) en las paredes interiores y el fondo de los reactores. Esto obviamente hace que los costos de construcción no sean los esperados para un sistema a escala real. Cuando se diseñan para zonas rurales y suburbanas debe tomarse en consideración la topografía de la zona y los materiales y plantas características de la región, con objeto de disminuir considerablemente los costos de construcción y operación (Esponda-Aguilar, 2001a,b).

3.1.1 Zona Cultural de la Ciudad Universitaria

Las actividades estuvieron enfocadas en la estabilización y optimización del HAFVD ubicado en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria. Dadas las condiciones en que se encontraba el sistema, de inundación total, para favorecer la formación de la zona radicular, se inició con un mantenimiento general, en paralelo con la revisión bibliográfica, sobre esta ecotecnología. Después, se planteó un seguimiento periódico, desde la organización de un calendario de actividades, definiendo los días de mantenimiento, toma de muestras, determinación de algunas propiedades físicas y químicas del sistema. De la misma manera, se determinó el flujo de entrada al humedal. Esto permitió definir el flujo más apropiado y tener los tiempos de irrigación establecidos y sincronizados con la toma de muestras, ya que este sistema no es continuo sino intermitente. En las Figuras 3.1 y 3.2 se da detalle claramente de las condiciones en las que se encontraba el HAFVD, después de ajustar el nivel de inundación (etapa de arranque del sistema). Cuando se inició la etapa del arranque en el HAFVD se observó que el sistema contaba con muy pocas plantas, sobre todo en la zona donde se sembraron plantas distintas a los carrizos (Esponda-Aguilar, 2001a,b), por lo que se



decidió incrementar su densidad. En la Figura 3.3 se pueden apreciar los carrizos plantados, que aún cuando se observan secos no están muertos, sino que se encuentran en una etapa de adaptación.



Figura 3.1. Vista frontal del HAFVD



Figura 3.2. Vista lateral del HAFVD



Figura 3.3. Incremento de la densidad de plantas (carrizos) en el HAFVD

En la etapa de arranque se verificó que todo el equipo estuviera funcionando, y se dio mantenimiento a la tubería de irrigación además de colocarla al nivel del lecho. Esto se puede observar en la Figura 3.4. En la Figura 3.5 se aprecia como empiezan a reverdecer los carrizos plantados mostrando con esto la gran resistencia y adaptabilidad de este tipo de plantas. El diagrama de flujo del sistema se presenta en el Anexo A.1, su ubicación en la zona de la Ciudad Universitaria y el origen de las aguas residuales, que son las oficinas de algunas dependencias universitarias, se presentan



en los Anexos A.2 al A.4. Para poder disminuir la carga orgánica en el sedimentador secundario se decidió quitar uno de los flujos de entrada, el cual no estaba contemplado en el diseño original (Esponda-Aguilar, 2001a,b). En las Figuras 3.6 a 3.8 se aprecia esta modificación.



Figura 3.4. Mantenimiento y reacondicionamiento de la tubería de irrigación en el HAFVD



Figura 3.5. Adaptación de los nuevos carrizos en el HAFVD



Figura 3.6. Vista de la modificación a la tubería



Figura 3.7. Vista de la modificación a la tubería en dirección al tanque homogenizador



Figura 3.8. Vista general de la modificación realizada en la tubería proveniente de los edificios



En el transcurso del periodo de evaluación, el HAFVD fue invadido por una plaga de chapulines, los cuales atacaron a los zacaltules y tules, sin afectar a los carrizos. En las Figuras 3.9 y 3.10 se aprecia esta plaga de chapulines y las condiciones en que dejaban a las plantas.



Figura 3.9. Plaga de chapulines en el HAFVD



Figura 3.10. Vista de las hojas de los tules siendo consumidas por los chapulines

Las Figuras 3.11 y 3.12 muestran las condiciones en las que se mantuvo el HA en el periodo de la determinación de propiedades físicas y químicas.



Figura 3.11. HAFVD en el periodo de operación vista de frente



Figura 3.12. HAFVD en el periodo de operación vista lateral



3.1.2 VIVEROS DE COYOACÁN

Las actividades durante el periodo experimental estuvieron encaminadas a la ejecución de la puesta en operación y seguimiento del humedal artificial para tratamiento de agua residual a escala prototipo ubicada en las instalaciones de los Viveros de Coyoacán. El diagrama de flujo del sistema se presenta en el Anexo A.5, su ubicación en la zona de Coyoacán y el origen de las aguas residuales, que es el río Magdalena, se presentan en los Anexos A.6 al A.10. Las labores incluyeron parte del mantenimiento y acondicionamiento.

Es de suma importancia conocer el funcionamiento del sistema, por lo que antes de realizar alguna labor de mantenimiento se efectuó un reconocimiento físico del sistema. Posteriormente, se realizó una poda parcial de las plantas, como lo muestra la Figura 3.13, seguida de una purga de lodos del sedimentador (Figura 3.14), así como la colocación de una bomba nueva dentro de la cisterna ya que la bomba anterior se descompuso como. También se instaló un nuevo flotador vertical dentro de la cisterna, como se observa en la Figura 3.15 y un flotador interruptor en el sedimentador.



Figura 3.13. Vista general de la poda parcial en el humedal



Figura 3.14. Labores de purga de lodos en el sedimentador



Figura 3.15. Arreglo del flotador interruptor vertical dentro de la cisterna

Cabe destacar que en el periodo de seguimiento, se realizaron labores de acondicionamiento al humedal por personal del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, entidad anteriormente conocida como Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DGCOH. El acondicionamiento consistió en elaborar una pared alrededor del sedimentador con el propósito de evitar derrumbes de tierra hacia el sedimentador, como lo muestran las Figuras 3.16 y 3.17.



Figura 3.16. Detalle de las paredes sin registrar en el sedimentador



Figura 3.17. Construcción de paredes dentro del registro del sedimentador



También se efectuó la construcción de un cercado alrededor del humedal, con objeto de evitar el vandalismo hacia la planta piloto (Figura 3.18). Durante estos periodos, el funcionamiento de la planta de tratamiento se mantuvo en forma intermitente. Un acontecimiento inesperado durante este periodo fue el de una inundación completa del humedal, por causas desconocidas derivadas del control en los sistemas hidráulicos de la DGCOH. Esto interrumpió temporalmente el seguimiento del sistema (ver Figuras 3.19 y 3.20), con objeto de efectuar labores correctivas para minimizar el impacto dentro del sistema.



Figura 3.18. Vista general de la cerca en el humedal



Figura 3.19. Nivel del agua residual alcanzado durante la inundación dentro del humedal



Figura 3.20. Labores correctivas para minimizar el impacto dentro del humedal



3.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

Como ambos sistemas son evaluados usando los mismos parámetros, su seguimiento sirvió para la determinación de algunas características de las aguas que se tratan mediante estos sistemas. La descripción prolija de los métodos analíticos se presentan en los Anexos A.11 al A.15, así como el tratamiento de los residuos generados por la técnica de determinación de la DQOt, la cual es explicada en el Anexo A.20. A continuación, se describen en forma somera los parámetros tomados. En ambos humedales en estudio se efectuaron tomas de muestras representativas para caracterizar influentes y efluentes. Siempre se procuró efectuar el muestreo en horas establecidas para tal efecto. A las 11:00 A.M., en el HAFH y alrededor del mediodía (12:00 horas), en el HAFVD. Se transportaron al laboratorio siguiendo la norma NMX-AA-003-1980, referente a la toma y transporte de muestras. Se analizaron por triplicado.

3.2.1 Demanda química de oxígeno

Es la medición de la materia orgánica e inorgánica presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada en un medio ácido por un fuerte oxidante como el permanganato o el dicromato de potasio expuesta a una temperatura entre 150 y 200°C. Puede medir la cantidad de materia disuelta (DQOs) o la total (DQOt), que incluye el material en suspensión. Si se le adicionan algunos reactivos para eliminar los iones inorgánicos, puede medir solamente el contenido de material orgánico (sulfato de mercurio). Para acelerar la reacción de oxidación se agregan catalizadores (sulfato de plata). Por ello, este parámetro es representativo ya que el agua residual presenta una cantidad considerable de materia orgánica que no es biodegradable y puede ser incluso tóxica. Como ya se mencionó en el Capítulo 2, la DBO resulta un parámetro poco confiable cuando se tiene la sospecha de que existen sustancias potencialmente tóxicas. En esta investigación no se determinaron DQOs sino DQOt. La metodología usada es una modificación del método oficial de la APHA-AWWA-WPCF (1989), propuesta por Oaxaca-Grande (1997), ver Anexo A.11.



3.2.2 Oxígeno disuelto

Es la cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto en el agua y se incrementa cuando el agua es sometida a procesos de aireación natural o artificial, situación que se favorece por la actividad fotosintética de la fracción vegetal del humedal. El oxígeno disuelto se requiere para la respiración de microorganismos aerobios, los cuales efectúan la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual. Se empleó el equipo de campo marca Hach, de acuerdo con las instrucciones del fabricante (Anexo A.13).

3.2.3 Conductividad eléctrica

Indica la presencia de sales, iones y minerales disueltos en el agua. La presencia de sales afecta positiva o negativamente el crecimiento de las plantas, dependiendo de sus características químicas. Para medirla se empleó el equipo Corning Modelo Check-Mate 90 De Luxe, de acuerdo con las instrucciones del fabricante (Anexo A.13).

3.2.4 Sólidos disueltos totales

Es la cantidad total de materiales orgánicos e inorgánicos disueltos en el agua. Una cantidad excesiva de sólidos disueltos, la inhabilitan para consumo humano y para usos industriales que requieren de aguas "blandas". También se define como la cantidad de sales y materia orgánica disuelta en una muestra que atraviesa un filtro (APHA-AWWA-WPCF, 1989), existe una relación directa con la conductividad eléctrica. Debido a la relación directa que existe entre este parámetro y la conductividad eléctrica la gráfica de sólidos totales disueltos tiene un comportamiento similar al de la conductividad eléctrica. Esto es explicado por la ecuación siguiente que las relaciona (Metcalf y Eddy, 1991):

$$\text{SDT [mg/L]} = \text{CE [mmho cm}^{-1} \text{ o dS m}^{-1}] \quad (3-1)$$

donde SDT = Sólidos disueltos totales



CE = Conductividad eléctrica

3.2.5 Valor de pH

Sin duda, es un parámetro importante en el comportamiento del sistema, ya que al registrarlo se verifica que no rebase los valores permisibles para los componentes del sistema (plantas, microorganismos y lecho inerte). Los microorganismos del sistema se afectan precisamente por el pH. Es también importante en el desarrollo de las plantas (carrizos, papiros, tules y zacatules) que se encuentran en los sistemas ya que estas plantas subsisten en intervalos amplios de pH que van de 2 a 8 (Metcalf y Eddy, 1991). Se empleó, para su medición, el equipo Corning Modelo Check-Mate 90 De Luxe, de acuerdo con las instrucciones del fabricante, con base en la Norma Mexicana NMX-AA-008-1980 (Anexo A.13).

3.3 PARÁMETROS FÍSICOS

3.3.1 Sólidos sedimentables

Es la materia que queda en el fondo de un recipiente después de sedimentar un litro de solución en un tiempo de 30 minutos. Se usó un cono Imhoff, de acuerdo con las instrucciones de la APHA-AWWA-WPCF (1989), según la Norma Mexicana NMX-AA-004-1977 (Anexo A.12).

3.3.2 Temperatura

Cuando la temperatura alcanza el valor de 0°C o menos por un tiempo indefinido ocurre la falla física en el humedal, pues afecta el crecimiento de las plantas. También influye en la actividad microbiana, pues a bajas temperaturas la velocidad de biodegradación tiende a disminuir. Este parámetro también está asociado con la cantidad de oxígeno disuelto, pues se favorece la disolución cuando la temperatura disminuye y viceversa. Se empleó, para su medición, el equipo Corning Modelo Check-Mate 90 De Luxe, de acuerdo con las instrucciones del fabricante y a la Norma Mexicana NMX-AA-007-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



1980. Las mediciones fueron hechas siempre a la misma hora, con objeto de que la variable fuera comparable a lo largo de la fase experimental (Anexo A.13).

3.4 MANTENIMIENTO FÍSICO DEL SISTEMA

Para mantener el sistema en operación óptima y continua se requiere del registro de todas las variables que influyen la operación adecuada en una bitácora. También deben incluirse los equipos que conforman el sistema, las podas periódicas de biomasa de las macrofitas y la limpieza de los sedimentadores primarios, así como la estabilización de esta biomasa antes de disponer de ella. Finalmente, deben consignarse los resultados del análisis de seguimiento físico y químico, con objeto de contar con toda la información pertinente a su operación y eficiencia.

3.5 CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN

3.5.1 Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo vertical descendente, HAFVD

El humedal tiene un área de 15m^2 conformados por 2.5m de ancho y 6m de largo, con una profundidad de 1.3m, a partir del lecho, obteniendo con esto un volumen total de 19.5m^3 . El medio de soporte está conformado de escoria volcánica dividido en 5 capas de diferente tamaño (Durán-de-Bazúa y col., 1998). La porosidad global del soporte es de 0.48. En la Figura 3.21 se pueden apreciar las diferentes capas del sustrato con sus diferentes tamaños de partícula.

Las plantas con las que se "sembró" originalmente el HAFVD fueron de tres tipos: Carrizos (*Phragmites australis*), tules (*Typha latifolia*) y Zacatlule o espadaña (*Cyperus sp.*) (Esponda-Aguilar, 2001a,b). Originalmente, éstas se encontraban divididas por secciones. Al incrementar la densidad de "carrizos" en el sistema, debido a su mayor adaptabilidad a las condiciones microclimáticas, poco a poco este tipo de planta ha ido reemplazando a las otras dos.



El sistema cuenta con un recubrimiento de polipropileno (PPE), el cual fue colocado sobre las paredes y fondo de cemento del reactor (humedal). Este recubrimiento, conocido como geomembrana sirve de protección impermeable para, por un lado, evitar las infiltraciones al subsuelo que contaminen los mantos acuíferos en caso de agrietamientos en las paredes y fondo provocados por asentamientos o movimientos telúricos) y, por otro lado, proteger esas paredes y fondo de bacterias que degradan el concreto, evitando que el agua residual pase al subsuelo. En las Figuras 3.22 y 3.23 se pueden apreciar las paredes de cemento y la geomembrana cubriendo estas paredes. Las especificaciones de la geomembrana se muestran en el Anexo A.4.

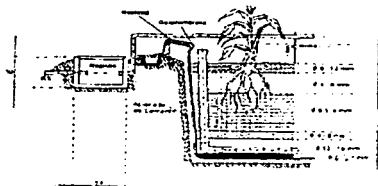


Figura 3.21. Detalles de los perfiles en el HAFVD (Fenoglio Limón 2000)

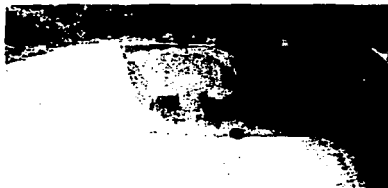


Figura 3.22. Paredes de concreto del HAFVD



Figura 3.23. Recubrimiento de PPE en las paredes del HAFVD



En el periodo de evaluación del HAFVD se manejaron dos diferentes flujos de entrada y, por consecuencia, dos tiempos de residencia hidráulica (TRH). El primer flujo fue de $0.45 \text{ m}^3/\text{d}$ con un TRH de 4.80 días. Este flujo se manejó del 11 de febrero al 8 de mayo de 2002. El segundo flujo fue de $0.40 \text{ m}^3/\text{d}$, con un TRH de 5.40 días, manejado del 8 de mayo al 5 de noviembre de 2002, cuando se dio por terminada esta parte experimental de la investigación. Estos flujos tuvieron un tratamiento de clarificación previa, consistente de un sedimentador (fosa séptica) y un tanque homogeneizador. Se empleó una electro-bomba autocebante controlada por un temporizador. La electro-bomba suministraba 0.09012 m^3 , 5 veces al día para el primer flujo y 0.1 m^3 , 4 veces al día, para el segundo flujo.

En las Figuras 3.24 y 3.25 se observan el tanque sedimentador (fosa séptica) y el tanque homogeneizador. En la Figura 3.26 se muestra la electro-bomba autocebante (sus características se presentan en el Anexo A.3).



Figura 3.24. Sedimentador primario del HAFVD (fosa séptica)



Figura 3.25. Tanque homogeneizador o segundo sedimentador del HAFVD

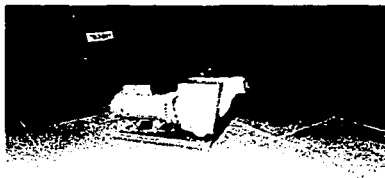


Figura 3.26. Electro-bomba autocebante del HAFVD

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Una de las características principales de HAFVD es la forma de alimentación; la cual se realiza irrigando el agua residual sobre toda la superficie del lecho, de la manera más homogénea posible. Para ello se tratan de evitar flujos preferenciales y de dar una forma de película o capa fina al flujo de entrada. El agua residual pasa a través del humedal escurriéndose en forma vertical por la zona de la rizosfera y espacios huecos, en donde se realiza el contacto de los contaminantes disueltos en el agua con los microorganismos y el oxígeno acumulado en los espacios huecos, además del proporcionado por la actividad fotosintética de las plantas.

Este escurrimiento se lleva a cabo, en el sistema en estudio, a lo largo de un metro, para llegar a la zona húmeda que consta de 30 centímetros de profundidad, en donde por gravedad va a ir desplazando al agua que se encuentra al fondo del humedal. En la Figura 3.27 se puede apreciar esquemáticamente como está construido el HAFVD.

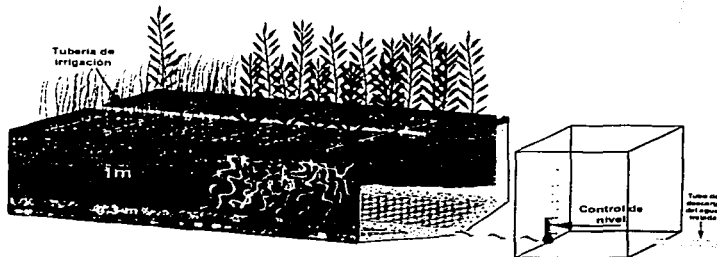


Figura 3.27. Esquematación de la salida del HAFVD

La operación de la planta piloto tipo HAFVD evita la infiltración de al menos 0.4 m^3 por día de agua contaminada, provenientes de los servicios sanitarios de los Talleres de Mantenimiento de la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM, además de que plantea una opción para tratar de forma secundaria todas las aguas residuales generadas en la zona. Estas aguas son consideradas como aguas residuales de tipo doméstico, ya que provienen de los sanitarios, regaderas y la cocina de estos talleres.



3.5.2 Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo horizontal, HAFH

De las bases de diseño, presentadas en el Anexo A.21, se desprenden las siguientes especificaciones de la planta piloto de tipo humedal artificial de flujo horizontal. El sistema tiene las siguientes dimensiones: Largo 15 metros, ancho 5 metros y profundidad 0.7 metros. El lecho o medio de soporte está conformado por escoria volcánica, distribuida uniformemente con un diámetro de partícula de 12.7 mm. El lecho está dentro de una cuenca o alberca recubierta por muros de concreto, los cuales están cubiertos con una geomembrana. Las características de la geomembrana se mencionan en el Anexo A.4. La porosidad promedio del medio de soporte o lecho es del 48%. Las plantas predominantes en el humedal artificial de flujo horizontal son los carrizos (*Phragmites australis*) aunque también se encuentran algunos papiros.

Las condiciones de operación se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Condiciones de operación del HAFH

Posición de apertura en la válvula de alimentación	Flujo alimentado hacia el humedal	Tiempo de residencia hidráulico
½	10.52 m ³ /día	2.74 días
¼	5.37 m ³ /día	5.30 días

El agua residual alimentada al sistema es tomada del efluente del río Magdalena, el cual al recibir aportaciones de las comunidades aledañas a su cauce y ser entubado y usado como colector de aguas residuales de toda clase, se le considera del tipo mixto (ver sus características promedio en el Anexo A.8).

Es succionada mediante una bomba sumergible marca BARNES, que descarga el agua residual en un sedimentador primario (fosa séptica), con una capacidad nominal de 1846 litros. El tiempo de residencia hidráulico del agua residual en el sedimentador fue de 30 min (½ hora). Mediante una válvula de globo se controla el flujo de alimentación



hacia el biorreactor (el tiempo de residencia hidráulica en el sedimentador varía dependiendo de la posición de apertura de la válvula de alimentación al humedal).

El influente es alimentado en forma continua por uno de los extremos del biorreactor, donde comienza la pendiente del mismo. El sistema de alimentación es un tubo horizontal perforado, que está montado de manera tal que facilite la infiltración por gravedad al lecho del humedal. La distribución del agua residual dentro del biorreactor se efectúa en forma horizontal, hasta el nivel de inundación de 50 a 55 centímetros. De esta forma se busca eliminar caminos preferenciales que reduzcan el área real de transferencia de masa y, por ende, la transformación de los contaminantes orgánicos en materiales inorgánicos como el CO_2 , agua, nitratos y sulfatos.

El plano general de la ubicación del humedal se muestra en el Anexo A.6. En él se pueden observar con más detalle la distribución del humedal y sus componentes.

El agua tratada se recibe en una cisterna elaborada para tal efecto. Las dimensiones de la cisterna son las siguientes: 1 metro de largo, 0.91 metros de ancho y 2 metros de profundidad. La altura máxima de descarga de la cisterna es de 0.55 metros. Dispone de un sistema de descarga, compuesto por un flotador interruptor horizontal marca SUMPTRON y de una motobomba eléctrica de 0.5 HP de potencia marca SIEMENS. La descarga del agua residual se efectúa hacia los canales de distribución del Vivero Forestal de Coyoacán para el riego de especies arbóreas.

En la Figura 3.28 muestra una vista lateral de la obra civil para el humedal artificial de flujo horizontal. En dicha figura se observa con detalle la distribución del material de empaque, así como algunas características de la tubería de PVC usada en la construcción.

En el siguiente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de esta investigación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

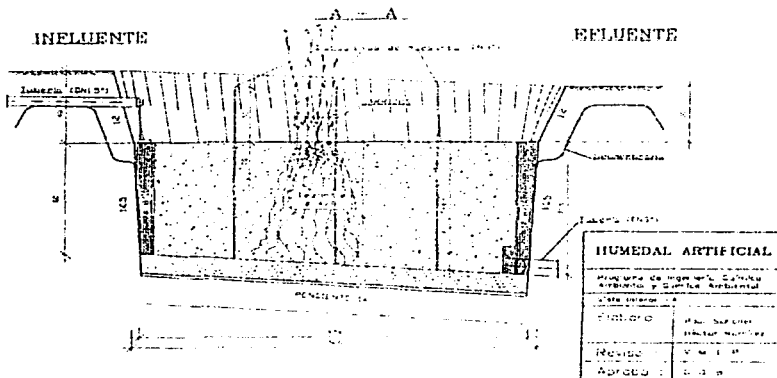


Figura 3.28. Detalle lateral de la obra civil para el humedal artificial de flujo horizontal (Ramírez-Carrillo, 1998)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para garantizar la obtención de resultados confiables del seguimiento de los parámetros fisicoquímicos en ambos sistemas, el HAFVD y el HAFH, la primera tarea fue realizar una investigación bibliográfica sobre este tipo de sistemas, la cual se mantuvo a lo largo de toda la experimentación y el análisis de los resultados. También se verificó que los equipos de los sistemas funcionaran correctamente y que, a lo largo de los meses de experimentos, se les diera el mantenimiento adecuado. Para ello, se enriquecieron los documentos elaborados por los tesisistas que construyeron y arrancaron estos dos sistemas (Esponda-Aguilar, 2001a,b; Fenoglio-Limón, 2000; Kneidinger, 1997; Millán-Hernández, 2000; Ramírez-Carrillo, 1998; Schaller, 1998).

Además del mantenimiento general del sistema, se incrementó la densidad de plantas (carrizos) dentro del cada humedal, especialmente del de flujo vertical. Esto se realizó a partir del 5 de noviembre de 2001 hasta el 9 de febrero del 2002 montando las metodologías analíticas de manera paralela y realizando análisis preliminares.

Las Tablas 4.1.a y b presentan un índice de los problemas operativos más comunes encontrados y los probables durante la operación de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical, respectivamente, basados en las experiencias de estos dos sistemas prototipo.

Se siguió la metodología propuesta por Esponda-Aguilar (2001a,b) para elaborar esas tablas. El listado presenta las acciones correctivas que se llevaron a cabo, en el caso particular así como con sugerencias de modificaciones que pueden ser aplicables a nuevos humedales que se construyan con estos principios con objeto de que estos problemas ya no se presenten o que sus efectos negativos se minimicen.

TRCIS CON
FALLA DE ORIGEN



Tabla 4.1a. Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFH

Situación observada	Problema real	Acción correctiva	Resultado	Sugerencias
El gasto de entrada al humedal disminuye paulatinamente hasta suspenderse	Obstrucción de la malla de retención dentro del sedimentador, debido a que está ubicada en la zona de acumulación de sólidos	Desmontar la malla y operar sin ella	El gasto de entrada se normaliza	En un equipo de sedimentación, debe colocarse una malla de retención por arriba del nivel de acumulación de los sólidos sedimentables
El contenido de sólidos sedimentables en el influente del humedal aumenta	La toma del tubo de succión se encuentra a la altura de la zona de acumulación de sólidos en el sedimentador	Cambiar la dirección del tubo, hacia la región intermedia del tanque sedimentador, libre de sólidos sedimentados o sobrenadantes	El contenido de sólidos en el influente del humedal disminuye hasta cantidades aceptables	El tubo de descarga del sedimentador primario debe ubicarse en una zona libre de acumulación de sólidos
La acumulación de sólidos sedimentables dentro del sedimentador primario ha sido mayor al valor de diseño	El río arrastra gran cantidad de sólidos en suspensión	Se retiran los sólidos en el sedimentador primario con ayuda de una moto-bomba solicitada a la encargada del Viviero	El sedimentador puede retener una cantidad importante de sólidos, según el objetivo de diseño	Verificar continuamente el estado de los equipos de retención de sólidos, así como la cantidad de sólidos sedimentables en sus efluentes
Las plantas tienen color amarillento	Las plantas son muy jóvenes y sus raíces no alcanzan el nivel de agua El clima es muy seco durante la etapa de invierno (en la Cd. de México)	Elevar el nivel de inundación del humedal	Las plantas han superado la etapa de adaptación y siguen creciendo	Se recomienda iniciar la siembra de plantas durante la estación húmeda del año o justamente en la primavera antes de que se inicien las lluvias

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Tabla 4.1b. Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFVD

Situación observada	Problema real	Acción correctiva	Resultado	Sugerencias
El nivel de agua dentro del humedal rebasa el nivel del lecho ocasionando una inundación	El humedal está trabajando en condiciones que no son adecuadas para este sistema en específico	Bajar la manguera de descarga en la cistema hasta llegar a una altura adecuada	Las plantas empiezan a verdecer y el sistema empieza a trabajar adecuadamente	Verificar el nivel de inundación dentro del humedal continuamente
Se observa que los sedimentadores están sobresaturados de material sobrenadante	Ambos sedimentadores no han tenido mantenimiento en un largo tiempo	Se solicita apoyo para el desazolve de ambos sedimentadores a las autoridades de la UNAM	Se reduce la carga en DQO en las muestras de entrada al humedal	Se recomienda realizar un desazolve regularmente cada seis meses
Las plantas tienen color amarillento y algunas están secándose	El clima es muy seco durante la etapa de invierno y algunas partes de la tubería de irrigación está tapada con lodos	Elevar el nivel de inundación del humedal y limpiar la tubería	Las plantas recuperan su color verde y siguen creciendo además de empezar a reproducirse	Se recomienda revisar la tubería de irrigación continuamente (una vez por semana)
El porcentaje de DQO aumenta y el sedimentador secundario se satura de lodos y matena sobrenadante	Una de las tuberías pasa directamente al sedimentador lo que ocasiona un incremento de lodos	Realizar una adaptación a esta tubería para evitar la entrada de aguas sin un tratamiento previo	Disminución de la carga orgánica y obtención de un tiempo más largo para realizar los desazolves	Debido a que hay dos edificios los cuales generan aguas residuales se recomienda hacer un sedimentador más grande
Mala distribución en el flujo de alimentación al humedal	La tubería de irrigación está obstruida o se desmontó alguna parte	Limpiar y ensamblar bien la tubería de irrigación	Mejor distribución del flujo a la entrada e incremento en la depuración	Revisar la tubería de irrigación cada 15 días



Todos estos puntos son útiles para que el desempeño de los sistemas sea el mejor posible, considerando las variables fuera de control. Entre las principales destaca la geohidrología, la variabilidad de la composición de las aguas residuales que llegan, ya que en el caso del humedal de tipo horizontal, éstas provienen de un río cuyo cauce se contamina por la presencia de asentamientos humanos que no respetan su uso natural y lo contaminan con sus residuos domésticos, comerciales e, incluso, industriales y, no menos importante, el vandalismo de los visitantes al Parque Forestal de los Viveros de Coyoacán.

Una vez concluidas estas tareas, se inició la evaluación sistemática del sistema. Los resultados que se obtuvieron abarcan del 12 de febrero al 5 de noviembre de 2002 (10 meses). Los parámetros fisicoquímicos a lo largo de estos diez meses fueron:

1. pH
2. Conductividad eléctrica
3. Sólidos totales disueltos
4. Oxígeno disuelto
5. Demanda química de oxígeno total

tomando como parámetro físico solamente la temperatura.

La evaluación del parámetro químico, la demanda química de oxígeno total ($DQO_{tot.}$) fue la base para emitir juicios sobre el comportamiento de los sistemas. Como ya se dijo en el Capítulo 2, la DQO es un parámetro analítico de contaminación que mide el material orgánico, tanto biodegradable como no biodegradable, mediante una oxidación química de los compuestos disueltos en una muestra líquida. Tiene la ventaja de ser mucho más rápido que la de DBO_5 y no está sujeto a tantas variables como las que pueden presentarse en un ensayo bioquímico (Metcalf y Eddy, 1991). Como se comentaba en el Capítulo 2, la obtención de valores bajos de DBO no indican necesariamente que la contaminación en la muestra de agua sea baja, ya que ésta puede ser provocada por sustancias químicas tóxicas, que hacen que los microorganismos no puedan degradar los compuestos biodegradables y, por ende, no consuman oxígeno disuelto. Desde este



punto de vista, en la mayor parte de las investigaciones a nivel nacional e internacional se emplea la DQO como el parámetro de seguimiento del comportamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con resultados confiables.

En los Anexos A.17 y A.18 se muestran las tablas con todos los resultados obtenidos a lo largo del período experimental en el HAFVD y en el HAFH. Se puede apreciar, para aquellas que muestran los datos fisicoquímicos, una línea vertical punteada, que muestra la fecha en que se realizó el cambio de flujo del influente en ambos humedales.

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL HAFVD

Las Figuras 4.1 a 4.7 muestran estos resultados de manera gráfica del humedal artificial de flujo vertical descendente.

4.1.1 Valores de pH en el HAFVD

En la Figura 4.1 se muestra el comportamiento del pH en el HAFVD. En el lapso del 12 de febrero al 18 de abril de 2002, no se observan grandes variaciones con respecto a los valores de pH, tanto en el flujo de entrada como en el de salida, esto debido principalmente a que el influente al humedal se mantuvo en un valor promedio de 7.15 en pH por lo que se considera como neutro, por consiguiente el valor promedio de pH en el efluente fue de 7.2.

A partir del 23 de abril al 6 de mayo hay un descenso del pH en el flujo de entrada, debido probablemente al inicio de la temporada de lluvias, ya que en la Ciudad de México la lluvia es ácida. En este periodo se puede observar cómo el sistema incrementó sus valores de pH en el flujo de salida manteniendo el agua del sistema en condiciones neutras.

A partir del 8 de mayo al 15 de octubre, se observa un incremento del pH en el influente. En este caso, probablemente el personal de los Talleres de Conservación utilizó algún tipo de sustancias en la limpieza de inodoros y cocinas que incrementó el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



pH hasta 1.18 unidades. Esto no se pudo corroborar ya que el personal no facilitó información al respecto. Se observa nuevamente, como en el caso de la temporada de lluvias, una capacidad amortiguadora del sistema hasta el 15 de octubre, ya que en el flujo de salida mantiene neutra el agua. A partir del 15 de octubre se observa un descenso del pH provocado probablemente al cambio de condiciones climáticas, que afectan la actividad microbiana en el sistema (ver temperatura ambiente en la Figura 4.2).

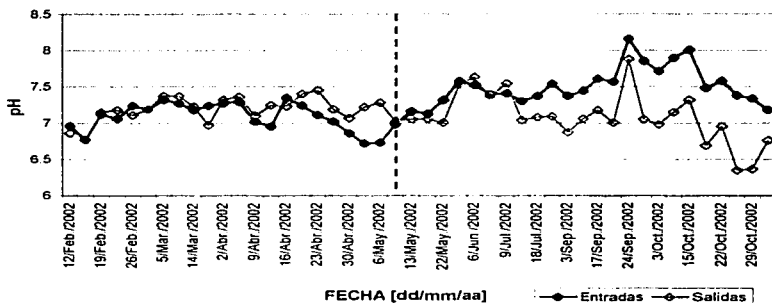


Figura 4.1. Comportamiento del pH en el HAFVD

4.1.2 Temperaturas en el HAFVD

En la Figura 4.2 se muestra el comportamiento de la temperatura. Las lecturas de temperatura en el HAFVD se realizaron aproximadamente a las 12 horas (mediodía). La toma de muestras también se programó en ese horario. Por lo regular, la temperatura de entrada en el humedal es mayor a la de salida. Esto puede deberse a que la toma de muestras se realiza al mediodía aunado a que el flujo de alimentación al humedal pasa por una tubería de 47 metros, de longitud en la cual el flujo de agua residual se calienta



por fricción y con el calor proporcionado por los rayos de sol puesto que en la Ciudad Universitaria prácticamente ninguna tubería está "enterrada".

El intervalo de temperatura general del sistema en el periodo de 10 meses fue de 16.7 a 31°C. Esto es importante debido a que el intervalo de temperatura no fue extremo y la actividad bacteriana no se ve inhibida y, de igual forma, no afectó la adaptación de las plantas así como en su desarrollo.

En el periodo del 4 de junio al 5 de noviembre del 2002 se midió la temperatura ambiente, con el fin de tener una mejor perspectiva del sistema. Se puede observar claramente que la temperatura ambiente en este periodo fue, en promedio, mayor que la de entrada, aunque hubo ocasiones en las que fueron iguales; solamente en dos casos fue menor. Se observó que el sistema mantiene el equilibrio térmico, por lo que se consideró entonces que este parámetro ambiental no afectó la comunidad bacteriana ni a las plantas.

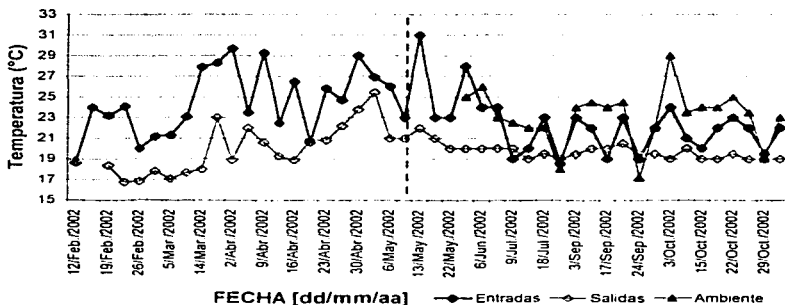


Figura 4.2. Comportamiento de la temperatura en el HAFVD



4.1.3 Conductividades eléctricas en el HAFVD

En la Figura 4.3 se pueden apreciar claramente los resultados de la conductividad eléctrica. Puede observarse la etapa de estabilización, en la que se llevaron a cabo las tareas de arranque y mantenimiento además de la siembra para incrementar la densidad de plantas dentro del humedal, que implicó movimientos del soporte de escoria volcánica, por lo que se obtuvieron valores altos de la conductividad al inicio del periodo de evaluación.

A partir del 19 de febrero al 23 de abril de 2002, se observa una relativa estabilización en cuanto a este parámetro. En el periodo del 23 de abril al 5 de septiembre de 2002 se observan grandes variaciones, debidas a la temporada de lluvias. Para el 17 de septiembre y hasta el 5 de noviembre que se terminó la fase experimental se observa cómo el sistema vuelve a tener un comportamiento estable. Las variaciones en la temporada de lluvias fueron provocadas por el arrastre de sólidos y sales, que se acumulan en el transcurso del año en los poros del lecho del humedal, provocando con esto aumento en al conductividad eléctrica en el flujo de salida.

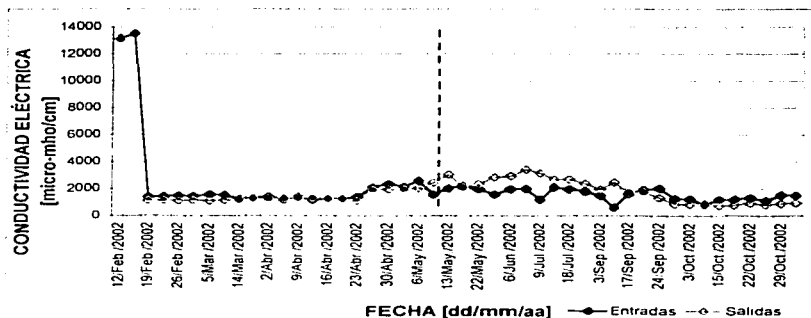


Figura 4.3. Comportamiento de la conductividad eléctrica en el HAFVD



4.1.4 Sólidos disueltos totales en el HAFVD

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, existe una relación entre los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica. Esta relación es explicada en la ecuación 3-1 que se encuentra en el Capítulo 3, inciso 3.2.4. Debido a esta relación es que ambos parámetros tienen el mismo comportamiento, lo cual se aprecia en las Figuras 4.3 y 4.4 en donde se observa que el comportamiento del contenido de sólidos disueltos totales es similar al de la conductividad eléctrica.

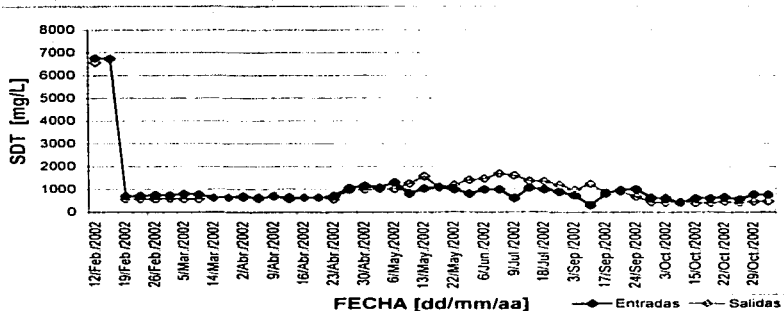


Figura 4.4. Comportamiento de los sólidos disueltos totales en el HAFVD

4.1.5 Oxígeno disuelto en el HAFVD

Los resultados de oxígeno disuelto se tienen a partir del 12 de febrero de 2002. Dado que el oxímetro necesitaba un cambio de membrana, a partir del 30 de abril se reanudaron las mediciones con el equipo de campo. Se observa claramente cómo el oxígeno en el flujo de entrada es menor al de salida gracias a la actividad biológica del sistema y al oxígeno obtenido por convección.



En la Figura 4.5 se observa la medición del día 8 de mayo de 2002 en la que hubo un decremento de la concentración de oxígeno disuelto, debido a que en esa ocasión se realizaron modificaciones en cuanto a la alimentación del influente. Además, se realizaron algunas pruebas de mediciones de flujo que "disturbaron" el sistema pero en los siguientes días se observa un incremento paulatino con respecto al oxígeno disuelto. En estos días se puede apreciar la adaptación de los microorganismos y las plantas.

Para los puntos del 4 de junio, 9 de julio y 8 de octubre se observa una reducción en la transferencia de oxígeno debida a que la tubería de irrigación necesitaba mantenimiento, provocando una mala distribución del flujo de entrada y, a su vez, la disminución de transferencia convectiva de oxígeno. A partir del 3 de septiembre, cuando se terminaron las lluvias hay un incremento en la transferencia de oxígeno. Aquí podría influir el efecto fotosintético debido al incremento de iluminación, al ya no haber nubosidad en el cielo, en la formación y transferencia de oxígeno.

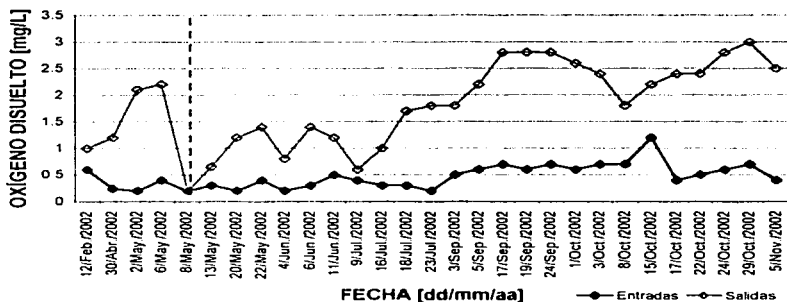


Figura 4.5. Comportamiento del oxígeno disuelto, OD, en el HAFVD



4.1.6 Demanda química de oxígeno total en el HAFVD

En la Figura 4.6 se presentan los resultados obtenidos en el sistema. El 8 de mayo de 2002 se realizó una modificación en el flujo de 450 litros a 400 litros al día, con el fin de aumentar el tiempo de sedimentación y observar el comportamiento del humedal con otro flujo (TRH de 5.4 días). Se aprecia la disminución en la carga orgánica en el flujo de entrada debido al mayor tiempo de sedimentación. El 9 de julio de 2002 se observa un incremento en la carga orgánica del flujo de salida. Esto se debió a que hacía falta darle mantenimiento a la tubería de irrigación ya que había una mala distribución del flujo de entrada al humedal. Como puede verse, los análisis rutinarios permiten hacer un seguimiento del comportamiento del humedal de manera sencilla y eficaz.

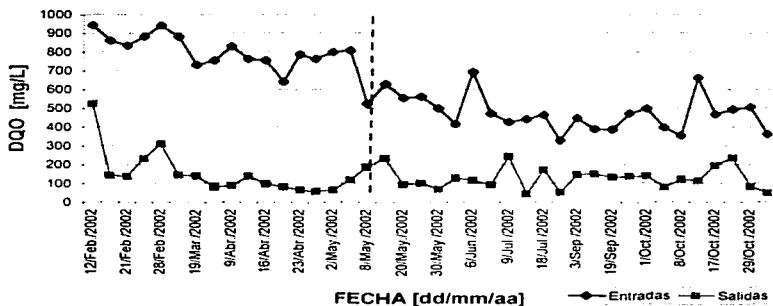


Figura 4.6. Comportamiento de la demanda química de oxígeno total en el HAFVD

Pueden verse claramente las dos etapas de estudio en el humedal. La primera fue del 12 de febrero al 8 de mayo de 2002 en la que se mantuvo el humedal con una alimentación de 450 litros diarios con un tiempo de residencia hidráulico calculado de 4.8 días, obteniendo un 80% de eliminación de DQO_{tot} . En esta etapa se tuvo una alta



carga orgánica. La segunda etapa fue a partir del 13 de mayo, en la que se disminuyó el flujo de entrada al humedal a 400 litros diarios con un tiempo de residencia hidráulico calculado de 5.4 días, obteniendo el 73% de eliminación de DQO_{tot} . Gracias al mayor tiempo de residencia en el segundo sedimentador se disminuyó la carga orgánica. Se aprecia que, en ambas etapas, se alcanzó la estabilización del sistema, con una concentración de salida relativamente constante, una clara bondad de este tipo de humedales. Para una evaluación depuradora específica es necesario estudiar otros flujos de entrada para verificar el efecto de los tiempos de residencia en los resultados de calidad del agua de salida.

La ecuación 4-1 se empleó para determinar la eficiencia de remoción, η :

$$\eta = [(E-S)/E] * 100 \text{ ----- (4-1)}$$

donde:

E = Valor de DQO_i del influente al humedal

S = Valor de DQO_e del efluente del humedal

En la Figura 4.7 se muestran los porcentajes de remoción, tanto los específicos para cada tiempo de residencia manejado (líneas gruesas horizontales), como el global a lo largo de la operación del sistema (línea punteada). La eficiencia de depuración global con respecto a la remoción de materia orgánica, medida como DQO_i , en el HAFVD durante todo el tiempo de evaluación fue de 77.5%.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

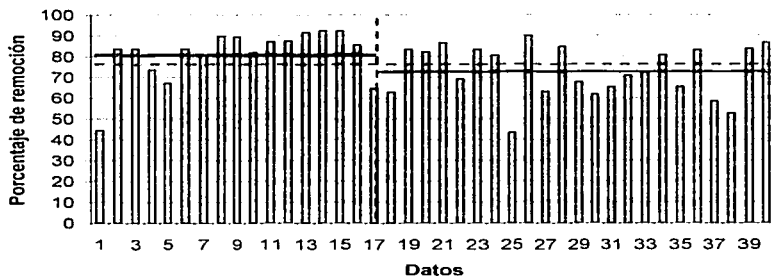


Figura 4.7. Eficiencias de depuración durante el periodo experimental en el HAFH

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL HAFH

Al igual que lo expuesto en el apartado anterior de resultados obtenidos para el HAFVD, las actividades realizadas en el HAFH, fueron similares, ya que se efectuaron simultáneamente. Primeramente se realizó una investigación bibliográfica, un reconocimiento físico del sistema en cuestión y una verificación en cuanto al funcionamiento del equipo. El periodo de evaluación del humedal artificial de flujo horizontal (HAFH), inició el día 11 de febrero de 2002 y concluyó el día 5 de noviembre del mismo año, abarcando 10 meses de actividades, sin considerar los meses de preparación y reacondicionamiento del sistema. Durante casi un año de funcionamiento del sistema se presentaron varios problemas de índole técnica, los cuales se considera que podrían ser típicos para este sistema y permitieron elaborar un manual de operación (guía) para las entidades que deseen aplicar esta ecotecnología (ver Anexo A.21).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



4.2.1 Valores de pH en el HAFH

En la Figura 4.8 el comportamiento del pH en el sistema es normal, ya que no existen grandes variaciones en el influente, el valor máximo alcanzado es de 7.8 y un mínimo de 6.66. En el efluente se tiene un valor máximo de 7.12 y un mínimo de 6.11 unidades de pH. Las fluctuaciones observadas en los primeros días de febrero de 2002 se deben a que en esta fecha se inicia el periodo de evaluación. En las fechas subsiguientes se observa que el sistema mantiene un efecto amortiguador a un valor cercano a 7 unidades de pH, exceptuando el día 18 de abril del 2002, donde el incremento en el valor de pH en el efluente se debió a una posible contaminación en la membrana del sensor del equipo de campo usado para medir el parámetro de pH. A partir del día 16 de julio de 2002 se nota un leve descenso en el pH del influente y efluente, causado por el periodo de lluvias. El incremento ocurrido el día 24 de septiembre se debió a que precisamente ese día hubo un descenso de temperatura, como se explica más adelante en la figura correspondiente a la temperatura. Después de esta fecha, el comportamiento de este parámetro vuelve a ser normal, a excepción de los días 24 y 29 de octubre, donde se observa un descenso drástico en los niveles de pH, debido a que en estos días probablemente alguna empresa derramó algún líquido ácido al drenaje, conclusión a la que se llegó después de verificar la calibración del sensor de pH y constatar que funcionaba correctamente. El valor promedio del pH en el influente y el efluente durante todo el periodo de evaluación fue 7.17 y 7.07, respectivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

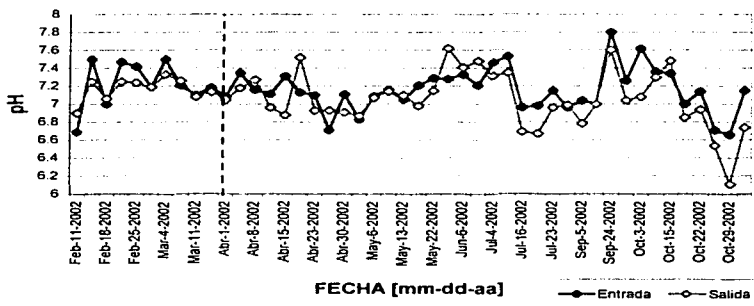


Figura 4.8. Comportamiento del pH en el HAFH

4.2.2 Temperaturas en el HAFH

La Figura 4.9 muestra el comportamiento de la temperatura del sistema. Se observa que en el influente se presentan temperaturas con un máximo de 26.4°C y un mínimo de 15°C. En el efluente, las temperaturas máxima y mínima fueron de 25.3°C y 14.8°C, respectivamente. Las fluctuaciones observadas antes de la fecha comprendida al 2 de mayo de 2002 son debidas a que las lecturas se efectuaron con un tiempo de muestreo diferente al programado, a causa de las operaciones de mantenimiento y solución de problemas operativos que se realizaban al momento de presentarse dichos problemas. También se observó que la temperatura ambiente, la cual fue evaluada a partir de junio no ejerce una influencia notable en el sistema, una vez que éste alcanza un equilibrio térmico con respecto al ambiente. A partir del día 24 de septiembre se aprecia un descenso de la temperatura ambiente así como en el influente. La temperatura en el influente fue de 18°C manteniéndose casi constante en los días subsiguientes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

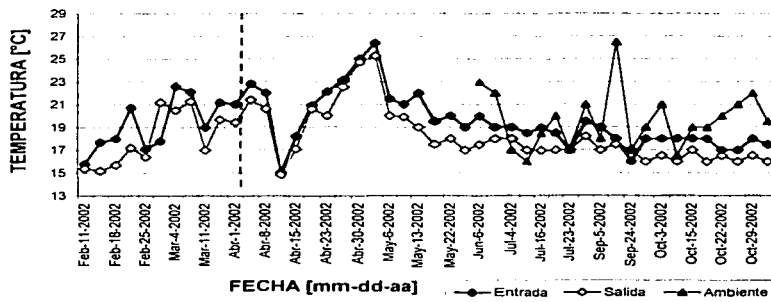


Figura 4.9. Comportamiento de la temperatura [°C] en el HAFH

4.2.3 Conductividades eléctricas en el HAFH

Al iniciar el periodo de muestreo (febrero 11 a febrero 20 de 2002), los niveles de la conductividad eléctrica eran altos, justamente por las labores de reacondicionamiento y arranque del sistema, como lo muestra la Figura 4.10. Es interesante corroborar que el valor medido el día 4 de marzo de 2002 se debe a una contaminación en los recipientes de muestreo. Esto implica que todas las acciones (muestreo, análisis, etc.), deben realizarse con estricto apego de la normatividad. A partir del 7 de marzo de 2002, el sistema estaba ya completamente estable con respecto a este parámetro. El cambio de flujo de alimentación efectuado el día 1 de abril de 2002 (línea discontinua en la Figura 4.10), no afectó en gran medida a este parámetro. El incremento en los niveles de salida de la conductividad eléctrica, entre fines de abril y septiembre se debieron a la lluvia registrada en ese lapso. Puede verse cómo el comportamiento de este parámetro comienza a normalizarse a partir de fines de septiembre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

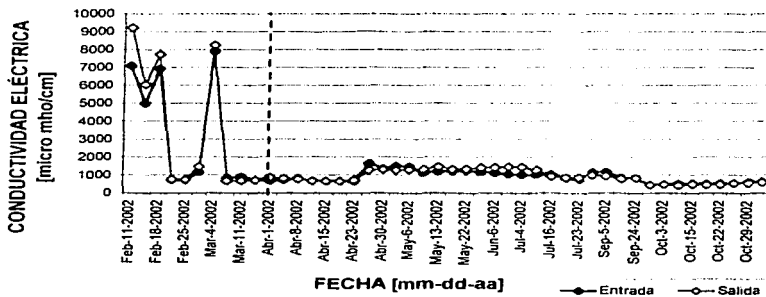


Figura 4.10. Comportamiento de la conductividad eléctrica [$\mu\text{mho/cm}$] en el HAFH

4.2.4 Sólidos disueltos totales en el HAFH

La Figura 4.11 muestra los valores obtenidos para los sólidos disueltos totales observándose obviamente un comportamiento muy similar a los mostrados en la Figura 4.10, debido a la relación directa que existe entre la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos. Esto se explicó con la ecuación 3-1, descrita en el Capítulo 3, inciso 3.2.4. Los incrementos registrados en el efluente del sistema a partir de abril a septiembre son debidos al periodo de lluvias. El agua de lluvia "lavo" el sustrato, arrastrando los sólidos acumulados durante el transcurso del año.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

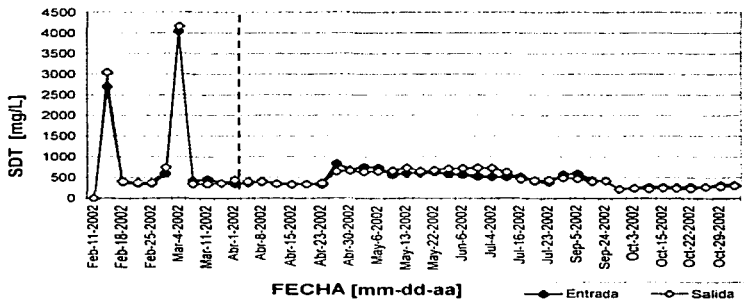


Figura 4.11. Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el HAFH

4.2.5 Oxígeno disuelto en el HAFH

Como se explicó en el Capítulo 2, se requiere el oxígeno disuelto para la respiración de microorganismos aerobios, los cuales efectúan la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual. El comportamiento de este parámetro se muestra en la Figura 4.12. Las determinaciones de oxígeno disuelto se iniciaron a partir del día 30 de abril de 2002 cuando se tuvo disponibilidad del equipo de campo (Anexo A.13). En el influente, la cantidad de oxígeno disuelto no presenta valores arriba de 1.5 mg/L. El valor máximo medido en el efluente es de 3 mg/L. Con esto se observa que el sistema aporta oxígeno al agua tratada debido a la actividad fotosintética de las plantas, especialmente al final del periodo de lluvias, ya que es notorio el incremento del aporte de oxígeno debido a la mayor exposición a los rayos solares de las mismas (Soto-Esquivel, 2003).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

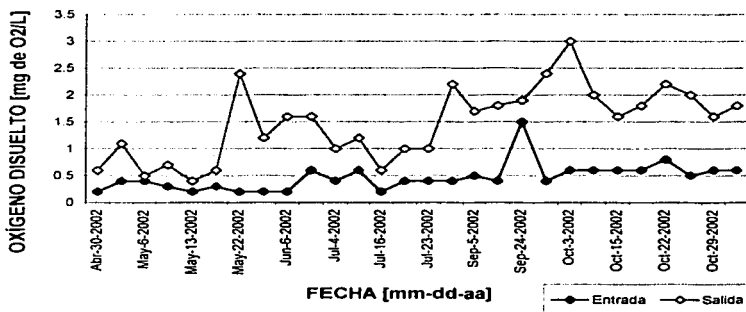


Figura 4.12. Comportamiento del oxígeno disuelto [mg de O₂/L] en el HAFH

4.2.6 Demanda química de oxígeno total en el HAFH

El comportamiento de este parámetro es muy variable debido a que las concentraciones de la DQO, dependen de lo que se vierte al cauce del río durante el lapso considerado (Figura 4.13). A partir del día 27 de febrero de 2002 el sistema comienza a funcionar en un régimen continuo. Las condiciones de operación a la entrada son de un flujo de 5.3 m³/d, con una posición de la válvula ¼ abierta. Durante este periodo hasta el 8 de mayo se llevó a cabo la limpieza de la malla dentro del sedimentador dos veces, eliminando la basura presente en la malla que cubre a la bomba sumergible y se purgaron los lodos presentes en el sedimentador primario.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

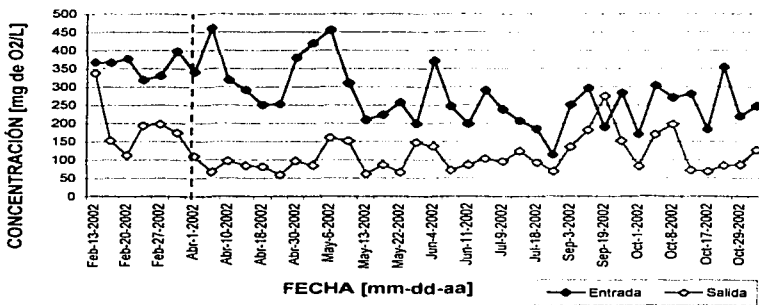


Figura 4.13. Comportamiento de la demanda química de oxígeno total en el HAFH

El abatimiento en la depuración del sistema, entre mediados de mayo y septiembre se explica por el periodo de lluvias como lo muestran los datos del 30 de mayo y subsiguientes. El día 4 de julio se purgaron lodos del sedimentador primario. El dato mostrado el día 19 de septiembre se explica por un desperfecto ocurrido al flotador dentro del sedimentador primario que ocasionó que se inundara el registro donde se encuentra el sedimentador. Debido a que el sistema de bombeo en la cisterna funcionaba correctamente se evitó que nuevamente se inundara por completo el sistema. Es por esta causa que el valor de salida del DQO aparece ser mayor que el de entrada. Se observa un incremento en los valores de salida hasta el día 8 de octubre debido a lluvias ocurridas en ese periodo, normalizándose después.

Como se explicó en el Capítulo 3, inciso 3.5.2, se trabajó con dos flujos de alimentación diferentes. El primer flujo que fue de $10.52 \text{ m}^3/\text{día}$, con un tiempo de residencia hidráulico de 2.737 días, se obtuvo manteniendo la válvula de alimentación medio abierta ($\frac{1}{2}$), en el periodo comprendido del 13 de febrero al 4 de marzo de 2002 (ver la línea discontinua en la Figura 4.13), obteniéndose los siguientes resultados:



	ENTRADA	SALIDA
DQO		
PROMEDIO	359.959447	195.233561
[mg/L]		

con un porcentaje promedio de remoción del 45.3%.

A partir del 1 de abril de 2002 se mantiene un flujo fijado de 5.3 m³/día, con un tiempo de residencia hidráulico de 5.3 días, en una posición de la válvula de alimentación ¼ abierta, teniéndose los siguientes resultados:

	ENTRADA	SALIDA
DQO		
PROMEDIO	272.849859	110.928237
[mg/L]		

con un porcentaje de remoción promedio del 59.3%.

Se observa que el nivel de depuración, [medida como DQO] se incrementa cuando se disminuye el flujo de alimentación al humedal. Es claro que recibiendo aguas residuales de composición altamente variable, la eficiencia de depuración no es muy alta. En la Figura 4.14 se muestra una comparación entre las eficiencias de depuración obtenidas en este sistema desde su arranque. Puede observarse que las fluctuaciones en la eficiencia de depuración son debidas a la variabilidad en la composición y concentración de los contaminantes presentes en el influente. La eficiencia global de depuración en promedio alcanzó el 56.8%, como lo muestra la línea gruesa horizontal en la Figura 4.14.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

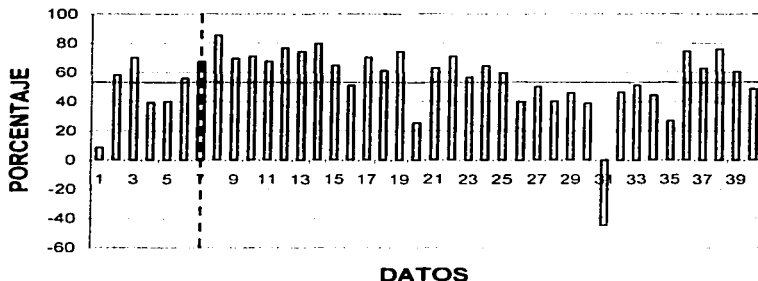


Figura 4.14. Eficiencias de depuración durante el periodo experimental en el HAFH

Se observa en la Figura 4.13, el nivel de depuración en el sistema es afectado por las condiciones climáticas, que provocan un descenso en la depuración en épocas de lluvia por el efecto del aumento de caudales reales y por la dilución. Esta situación debe siempre ser considerada para el diseño y construcción de los sistemas reales.

4.3 OTROS RESULTADOS IMPORTANTES

La determinación de microorganismos patógenos en el influente y el efluente de los humedales es un parámetro importante para garantizar la inocuidad de las aguas residuales tratadas y permite determinar el buen funcionamiento del sistema. Como la medición de organismos patógenos es muy complicada y costosa, la mayor parte de las legislaciones aceptan la medición de organismos indicadores de la posible presencia de elementos que dañen la salud de personas y animales. Dentro de los organismos indicadores más usados para esta medición indirecta se encuentran los organismos coliformes fecales, que se asocian a los organismos comúnmente encontrados en el tracto digestivo de los seres humanos y otros mamíferos, como *Escherichia coli* (Beerens, 1998). La mayor parte de las normatividades (NOM-112-SSA1-1994,



Santaella, 2002), emplean un método de dilución en tubos múltiples conocido como "Número más probable", NMP, y se señalan los límites permitidos para cualquier sistema de depuración (Tabla 4.2).

En esta investigación no se consideró la medición de este parámetro por la propia formación profesional (ingeniería química) pero, en el marco del proyecto global sí se evaluó. Con objeto de que los lectores sepan la interrelación entre las condiciones de operación y la cantidad de organismos indicadores presentes, en la misma Tabla 4.2 se dan algunos de los resultados obtenidos por otros investigadores en los mismos sistemas estudiados, el HAFVD y el HAFH. Los resultados de las pruebas microbiológicas que fueron efectuadas de manera simultánea con esta fase de la investigación experimental se presentan de manera separada en la Tabla 4.3. Observando los resultados de los parámetros fisicoquímicos y con la experiencia adquirida durante el tiempo de operación del sistema, pudo notarse que los microorganismos y plantas necesitan de tres a cuatro semanas para adaptarse a algún cambio de concentraciones en el influente al humedal.

Tabla 4.2. Límites establecidos por la normatividad mexicana para aguas tratadas (NOM-003-SEMARNAT-1997) comparados con los resultados obtenidos para los reactores en estudio en las dos plantas prototipo (Durán-de-Bazúa y col., 2002)

Reutilización (reúso)	Coliformes fecales, NMP/100 mL	Huevos de helmintos, Número/L	Grasas y aceites, mg/L	DBO ₅ (soluble), mg/L	Sólidos suspendidos totales, mg/L
Servicio público con Contacto Directo (NOM)	240	≤1	15	20	20
Servicio público con Contacto Indirecto u Ocasional (NOM)	1000	≤5	15	30	30
HAFH, HRT=5 d (HRT=1.8d), 75 m ²	2700 (120,000 LI) (5,100 S)	N.D.	<15	N.D.	<20
HAFVD, HRT=3.5 d, 15 m ²	800	N.D.	<15	N.D.	<20

N.D. No determinados HRT. Tiempo de residencia hidráulico por sus siglas en ingles

LI= Estación de lluvias, S= Estación de secas

(Datos en paréntesis de 1998-2000)

* La nomenclatura de las normas ECOL se modificaron a partir del 23 de abril de 2003 a

SEMARNAT.



Si se evaluara la eficiencia de remoción siguiendo un criterio similar al empleado para la DQOt se consideraría que el sistema es excelente ya que las eficiencias exceden valores de 99.9%. Sin embargo, para estos parámetros no se sigue este criterio sino que se evalúan las etapas logarítmicas que se han logrado reducir en estos sistemas. Para este caso, se redujeron cuatro "logs", que implica una excelente remoción (Green y col., 1997).

Tabla 4.3a. Determinación de coliformes en el HAFVD, NMP/100mL de agua (Guzmán-Aguirre, 2003)

Prueba	Influyente	Efluente
24/09/02	0.26×10^4	0.23×10^1
15/10/02	0.11×10^4	0.49×10^2
29/10/02	0.70×10^5	0.29×10^2
12/11/02	0.33×10^5	0.11×10^2
26/11/02	2.20×10^5	0.21×10^2
7/1/03	2.80×10^5	0.17×10^2
Promedio	1.01×10^5	2.15×10^1

Tabla 4.3b. Determinación de coliformes en el HAFH, NMP/100mL de agua (Guzmán-Aguirre, 2003)

Prueba	Influyente	Efluente
26/09/02	0.26×10^4	0.22×10^2
17/10/02	9.2×10^3	0.078×10^1
31/10/02	2.24×10^4	0.078×10^1
14/11/02	0.26×10^5	0.14×10^2
28/11/02	2.2×10^5	0.22×10^2
9/1/03	2.80×10^4	0.068×10^2
Promedio	0.51×10^5	1.106×10^1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En el mismo estudio simultáneo se realizaron análisis de identificación y cuantificación de un organismo patógeno, la salmonela. En 1880, Eberth publicó el hallazgo de un bacilo gram negativo en personas muertas por fiebre tifoidea, que resultó ser *Salmonella typhi* y que genera un antígeno tóxico (Guerrero, 2002). Por ello resulta importante saber lo que ocurre con este organismo en los humedales artificiales. Generalmente se identifican y cuantifican en medios de cultivo selectivos y se miden como unidades formadoras de colonias, UFC, por unidad de masa o de volumen. Las Tablas 4.4a y 4.4b presenta los resultados obtenidos en la fase de estabilidad de los reactores.

Tabla 4.4a. Determinación de *Salmonella sp.* en el HAFVD (Guzmán-Aguirre, 2003)

Medio de cultivo	UFC/mL		
	Agar SS	Agar XLD	Agar MacConkey
Influyente, Dil. 10^{-2}	128×10^3	187×10^3	186×10^3
Efluente, Dil. 10^{-2}	Ausencia	1.0×10^2	Ausencia

Tabla 4.4b. Determinación de *Salmonella sp.* en el HAFH (Guzmán-Aguirre, 2003)

Medio de cultivo	UFC/mL		
	Agar SS	Agar XLD	Agar MacConkey
Influyente, Dil. 10^{-2}	83×10^3	60×10^3	45×10^3
Efluente, Dil. 10^{-2}	20	70	50

Estos resultados indican que en el sistema de flujo vertical, aunque se tenga una cantidad de organismos mayor, es más fácilmente controlable por el sistema (ya que los efluentes provienen de una oficina administrativa de la UNAM en la que no vienen sustancias orgánicas tóxicas), mientras que en el sistema de flujo horizontal, debido a la presencia de tantos compuestos tóxicos, el sistema no puede eliminar completamente a estos patógenos, aún cuando su número inicial es menor.

Para terminar este análisis de los resultados obtenidos en ambos sistemas de humedales, se comentará lo siguiente:



En ambos sistemas (HAFVD y HAFH), se cumple con las Normas Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, en lo referente a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, en lo referente al uso para riego agrícola con descarga al suelo. Con respecto a la Norma NOM-003-SEMARNAT-1997, referente a los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público también se cumple con los parámetros especificados (Tablas 4.5 y 4.6). En el Anexo A.22 se muestran las tablas completas para límites máximos permisibles para contaminantes básicos obtenida de las NOM-001-SEMARNAT-1997 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 4.5. Comparación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en el HAFVD y las Normas Mexicanas

PARÁMETRO	Valor promedio en el HAFVD		NOM-001-SEMARNAT-1996 (a)		NOM-003-SEMARNAT-1997 (b) (c)		PROY. NOM 004-SEMARNAT-2000 (d)	
	Entrada	Salida	Min.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.
T [°C]	23.4	19.8	NA	NA	ND	ND	ND	ND
Valor de pH	7.31	7.14	5	9	ND	ND	ND	ND
CE	2090	1926			ND	ND	ND	ND
[µmho cm ⁻¹]								
SDT [mg/L]	1047	966	ND	ND	ND	ND	ND	ND
OD [mg/L]	0.47	1.83	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DQOt [mg/L]	610	138	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Coliformes fecales [NMP/100 mL agua]	1.01x10 ⁴	2.006x10 ¹	ND	ND	240	1000	<1000 [NMP/g] *	2000
<i>Salmonella</i> en Agar SS [UFC/mL]	128x10 ³	Ausencia	ND	ND	ND	ND	< 3 [NMP/g] *	ND
<i>Salmonella</i> en Agar XLD [UFC/mL]	187x10 ³	1.0x10 ²	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Salmonella</i> en Agar MacConkey [UFC/mL]	186x10 ³	Ausencia	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND = No determinado, NA = No aplica

NMP = Número más probable, UFC = Unidades formadoras de colonias

- (a) Uso en riego agrícola
- (b) Servicios al público con contacto directo
- (c) Servicios al público con contacto indirecto u ocasional
- (d) Límite máximo permisible en agua de riego

* Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en estiércol, lodos residuales y otros fertilizantes orgánicos

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Tabla 4.6. Comparación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en el HAFH y las Normas Mexicanas

Parámetro	Valor promedio en el HAFH		NOM-001-SEMARNAT-1996 (a)		NOM-003-SEMARNAT-1997 (b) (c)		PROY. NOM 004-SEMARNAT-2000 (d)	
	ENTRADA	SALIDA	Min.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.
T [°C]	19.5	18.2	NA	NA	ND	ND	ND	ND
Valor de pH	7.17	7.08	5	9	ND	ND	ND	ND
CE	1408	1521	ND	ND	ND	ND	ND	ND
[µmho cm ⁻¹]								
SDT [mg/L]	566	587	ND	ND	ND	ND	ND	ND
OD [mg/L]	0.47	1.48	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DQOt [mg/L]	286	124	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Coliformes fecales [NMP/100 mL agua]	0.51x10 ⁵	1.11x10 ¹	ND	ND	240	1000	<1000 [NMP/g] *	200 0
<i>Salmonella</i> en Agar SS [UFC/mL]	83x10 ³	20	ND	ND	ND	ND	< 3 [NMP/g] *	ND
<i>Salmonella</i> en Agar XLD [UFC/mL]	60x10 ³	70	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Salmonella</i> en Agar MacConkey [UFC/ml]	45x10 ³	50	ND	ND	ND	ND	ND	ND

(a) Uso en riego agrícola

(b) Servicios al público con contacto directo

(c) Servicios al público con contacto indirecto u ocasional

(d) Límite máximo permisible en agua de riego

* Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en estiércol, lodos residuales y otros fertilizantes orgánicos

ND = No determinado, NA = No aplica

NMP = Número más probable, UFC = Unidades formadoras de colonias

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 SISTEMA HAFVD

5.1.1 Conclusiones

A lo largo del periodo en estudio se obtuvieron resultados utilizando dos diferentes flujos, alcanzando en ambos la estabilización. En el caso del primer flujo, que es de $0.45 \text{ m}^3/\text{d}$ con un TRH de 4.8 días, se puede apreciar que el sistema puede degradar adecuadamente la materia orgánica (DQO_t inicial de aproximadamente 800 mg/L) y mantener un nivel de depuración (80% de eficiencia). En el segundo caso en donde el flujo fue menor ($0.40 \text{ m}^3/\text{d}$ con un TRH de 5.4 días) y con una menor cantidad de materia orgánica (DQO_t inicial de aproximadamente 600 mg/L), se observa un porcentaje de depuración ligeramente menor (73% de eficiencia), debido a la temporada de lluvias. En general, este sistema mostró una buena eficiencia de depuración, además de poder soportar grandes variaciones de carga orgánica en el flujo de entrada, sin que éstas produzcan perturbaciones apreciables en el sistema. También se pudo apreciar, en particular, la mayor adaptabilidad de los carrizos en este humedal, aquí en la Ciudad de México, ya que los tules y zacatales que se tienen en el reactor están tendiendo a desaparecer.

Este sistema mostró que, al realizar alguna perturbación con respecto a la carga orgánica en el flujo de entrada al humedal, se alcanza nuevamente su estabilidad en un periodo de tres a cuatro semanas.

Cabe mencionar que en la evaluación de este sistema se utilizaron plantas ya adaptadas a las condiciones climáticas de la Ciudad Universitaria, pero en la construcción de estos sistemas se debe considerar como un paso crítico, este tiempo de adaptación, ya que repercute en el tiempo de estabilización del sistema.



Otro paso crítico en estos sistemas es la presencia de sólidos o materia sedimentable en el techo del humedal ya que provoca, en principio, taponamientos en la tubería de irrigación, además de que disminuye el tiempo de vida del sustrato al reducir los poros y espacios vacíos, provocando rutas preferenciales o cortos circuitos hidráulicos, disminuyendo con esto la eficiencia depurativa del sistema.

En la evaluación del HAFVD no se determinaron los tiempos de residencia hidráulica experimentalmente, para cada una de las capas de material inerte, ni las caídas de presión, cuando el flujo pasa de un tamaño de partícula a otro. Esto hubiera podido ayudar a realizar un mejor análisis del sistema, considerándolo como una torre empacada, ya que la diferente granulometría es una característica principal en los humedales de flujo vertical. Estas determinaciones no se pudieron realizar debido a que se requiere de la porosidad de cada capa del sustrato, las cuales se debieron determinar con el sustrato que se empleó cuando se construyó el HAFVD. La porosidad que se consideró para las determinaciones teóricas fue de 0.48, la cual se consideró como porosidad global en todo el sustrato del sistema.

5.1.2 Recomendaciones

Algunas recomendaciones que se pueden hacer para el mantenimiento preventivo y la adecuada operación del sistema son las siguientes:

- Se debe realizar la limpieza de los dos sedimentadores primarios con los que cuenta por lo menos una vez al año.
- En el sedimentador 2 o tanque homogenizador se debe hacer la purga de los lodos cada tres meses.
- Se debe limpiar de escombros y polvo el equipo electromecánico y la electrobomba, realizando una supervisión cada mes.



- El mantenimiento del humedal y la tubería de irrigación se debe realizar cada mes.
- La poda de plantas dentro del humedal se debe realizar por lo menos una vez al año.
- Para un sistema de mayor tamaño, se recomienda hacer arreglos para facilitar el mantenimiento de la tubería de irrigación.
- Se debe revisar una vez al mes el nivel de inundación en el humedal, así como las condiciones en que está operando el sistema de descarga de agua tratada del sistema.

Respecto de las características constructivas del sistema se recomienda lo siguiente:

- a) Hacer otra cisterna para el agua de descarga del humedal, debido a que con el paso del tiempo se ha observado que la que se construyó con el sistema se empieza a inclinar cada vez más, debido a que está construido en una zona de relleno, además de que la cisterna que se construya debe ser a un nivel menor que el humedal.
- b) Construir un HAFH que se alimente con la misma agua residual, con el fin de poder realizar comparaciones entre los sistemas de flujo vertical y horizontal.

Se recomienda que el sistema no interrumpa su operación por periodos largos, debido a que es un sistema biológico y necesita de un tiempo considerable para estabilizarse de nuevo.

Sería conveniente verificar el comportamiento del HAFVD con un flujo continuo, que sea por goteo en el sustrato, en otras palabras si el sistema bombea 100 litros cada 6 horas en un tiempo de un minuto, hacer que durante las seis horas estén escurriendo los 100 litros. Esta situación daría condiciones mejores y más estables para los microorganismos y plantas, además de que no reduciría la transferencia de oxígeno en



el lecho. Asimismo, para zonas rurales donde no se tenga electricidad, la alimentación "por goteo" puede hacerse por gravedad.

5.2 SISTEMA HAFH

5.2.1 Conclusiones

Sin duda alguna, los humedales artificiales son una ecotecnología alternativa en la depuración de aguas residuales de áreas urbanas y rurales, principalmente en estas últimas donde el costo de adquisición de los terrenos es bajo, permitiendo contar con una planta de tratamiento ya que las de tipo convencional, por su costo, no solamente de construcción sino principalmente de operación, son prácticamente imposibles de instalar.

Se logró reacondicionar satisfactoriamente la planta a escala prototipo, de tal manera que sirve como un atractivo para los visitantes al Vivero Forestal de Coyoacán y para concienciarlos sobre la importancia de depurar las aguas residuales y mantener las aguas superficiales limpias, especialmente las de los ríos como el Magdalena.

Durante el periodo de evaluación se utilizaron dos flujos de alimentación diferentes, el primer flujo de alimentación usado era de $10.52 \text{ m}^3/\text{día}$ con un tiempo de residencia hidráulico de 2.7 días, obteniéndose eficiencias de remoción de DQO, del 45.3%. El segundo flujo de alimentación propuesto fue de $5.37 \text{ m}^3/\text{día}$ con un tiempo de residencia hidráulico de 5.3 días, en cuanto a la remoción en DQO, para este flujo de alimentación alcanzó el 59.3%. Al disminuir el flujo de alimentación al sistema, se incrementa la depuración de la DQO, pero, de igual forma, aumenta el tiempo de residencia hidráulico. Esto es importante ya que al aumentar el tiempo de residencia hidráulico aumenta el área necesaria para tratar un mismo volumen de agua residual.

En el HAFH es difícil determinar el tiempo de adaptación de las plantas y microorganismos a las nuevas condiciones de carga orgánica medida como DQO,



debido principalmente a la variación en la concentración de contaminantes presentes en el agua residual. Se observa cierta estabilidad en el sistema ya que durante el periodo de evaluación, la DQO_i en el efluente trata de mantenerse constante a pesar de las grandes variaciones presentes en el influente.

Debe considerarse que el agua a tratar proviene del río Magdalena y que sus aguas se contaminan con efluentes típicos de aguas residuales urbanas con una gran concentración de población, de industrias y servicios que desalojan sus aguas residuales sin un tratamiento previo a los drenajes y estos son vertidos al cauce del río.

Como se esperaba, al realizar una perturbación en el flujo de entrada, el sistema no responde de manera inmediata, debido a que el sistema tiene un periodo de adaptación a las nuevas condiciones. La actividad depurativa se encuentra afectada por las condiciones climáticas, disminuyendo en la temporada de lluvia y en invierno y aumentando en los días con mayor iluminación. Cabe la posibilidad que en la temporada de invierno los microorganismos desciendan su actividad depurativa por la adaptación de los mismos a las nuevas condiciones climáticas puesto que febrero es uno de los meses más fríos del año y fue cuando se inició esta investigación.

Debido a la forma en la que fue construido el HAFH, los pasos críticos detectados en el periodo de puesta en marcha y de evaluación son ocasionados principalmente por el buen o mal funcionamiento de los equipos electromecánicos instalados en el sistema. Un buen funcionamiento de los equipos electromecánicos no presenta pasos críticos detectados en el sistema; sin embargo, el mal funcionamiento de un solo equipo ocasiona que el sistema pare por lo menos un día. Dichos equipos tienen que ser verificados frecuentemente para no interrumpir el funcionamiento del sistema biológico.

Es indispensable que el sistema cuente con un tanque homogenizador, ya que el tanque que funciona como sedimentador primario no es capaz de homogenizar el agua residual del influente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En cuanto al uso del agua tratada como agua de riego, con base en los resultados obtenidos en los parámetros fisicoquímicos, así como los análisis microbiológicos efectuados, se puede inferir que el agua tratada mediante este sistema cumple con las Normas Mexicanas, NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y el proyecto de norma NOM-004-SEMARNAT-2000, para uso como agua de riego en suelo y el contacto público ocasional.

5.2.2 Recomendaciones

Como se especifica al inicio del Capítulo 3 este sistema fue construido con propósito de investigación, por lo que dicho sistema tiene una problemática que se debe evitar en la construcción de este tipo de sistemas. La problemática a la que se hace referencia es que el HAFH se encuentra construido dentro de una cuenca, la cual se encuentra por debajo del nivel de piso. Esto provoca una serie de problemas operativos, siendo el principal la posible inundación del sistema, así como derrumbes de tierra dentro del sedimentador primario. La supervisión del equipo electromecánico debe ser frecuente para prevenir dicha inundación. En las temporadas de lluvia no se cuenta dentro del sistema con un aditamento que auxilie a la evacuación del agua en exceso. Estas experiencias adquiridas durante la fase experimental proveen de un conocimiento para diseños futuros. Algunas sugerencias que surgen de la experiencia en este sistema y que pueden ser adaptados en futuras construcciones son:

1. Efectuar la construcción del HAFH al nivel del piso y que el agua residual llegue por gravedad.
2. Contar con canales laterales que eviten deslaves e inundaciones provocadas por el reblandecimiento del terreno.
3. Construir un tanque homogenizador o en su defecto contar con un sedimentador primario que permita un mayor tiempo de residencia al agua residual.
4. Contar en el sedimentador primario con una válvula de purga de lodos y con ventilación adecuada para eliminar la acumulación de gases tóxicos o inflamables.
5. Evitar en lo posible el uso de equipos electromecánicos.



6. Contar en el sistema con aditamentos que auxilien en la evacuación del agua en exceso en caso de una tromba.
7. Contar en el sistema con espacio suficiente para realizar mantenimiento.

Algunas recomendaciones que se pueden dar para el mantenimiento preventivo y la operación adecuada del sistema son:

1. Realizar la limpieza de la malla protectora dentro del sedimentador primario cada quince días.
2. Purgar los lodos del sedimentador aproximadamente cada tres meses. Se debe tener cuidado con el manejo de los lodos ya que son infecciosos.
3. Podar los carrizos cada seis meses o cuando alcancen una altura mayor a 2 metros. La altura de poda de los carrizos no debe ser menor a un metro de altura.
4. Elaborar un calendario de adquisición de material eléctrico y electromecánico ya que el correcto funcionamiento de este sistema en particular está basado en un buen funcionamiento de sus partes eléctricas y electromecánicas. Dichas partes tienen una vida útil de aproximadamente cinco años.
5. Construir un humedal artificial de flujo vertical en el mismo sitio de ubicación del sistema en estudio con el propósito de tener datos comparativos fidedignos y confiables para evaluar si hay diferencias entre ambos sistemas.
6. Es necesario contar con un área exclusiva para el tratamiento de lodos y la elaboración de composta.

Dentro de estas recomendaciones cabe señalarse la necesidad de resolver los problemas operativos inmediatamente, cuando se presenten, con objeto de no dañar las condiciones de operación del sistema o tenerlo que dejar sin funcionar por periodos prolongados que van en detrimento de su efectividad depurativa.

5.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El tratamiento de aguas residuales mediante esta ecotecnología se ofrece como una buena alternativa en lugares donde no se dispone del poder adquisitivo para instalar



una planta de tratamiento convencional. Una desventaja que se encuentra al tratar de implementar estos sistemas en la ciudad es el requerimiento de grandes áreas para la construcción de un humedal artificial pero, sin duda, el beneficio es considerable.

Es importante que al construir un humedal éste se encuentre topográficamente en el mejor lugar. La experiencia adquirida durante esta investigación muestra que este tipo de construcción conlleva más obras de mantenimiento y costos en su construcción cuando esto no se cumple. Se debe procurar utilizar sitios con desniveles para aprovechar los flujos por gravedad.

Es necesario tener en cuenta un sistema de pretratamiento del agua residual ya que la presencia de una cantidad excesiva de sólidos sedimentables dentro del humedal perjudica el tiempo de vida útil. No se debe combinar especies diferentes de plantas en el humedal, ya que se corre el riesgo de que alguna de ellas o todas sean atacadas por plagas.

En la construcción de este tipo de sistemas se recomienda que los sedimentadores primarios tengan el fondo en forma de cono, conectado a una válvula de purga, o en su defecto, si el sedimentador es de concreto con mamparas, construirlo con un declive hacia la válvula de purga, pintando las paredes con pintura epóxica, dejando las tapas móviles para poder hacer labores de mantenimiento. Los sedimentadores deben estar en un nivel arriba del humedal, para poder hacer un arreglo en la tubería de irrigación de tal forma que se eviten los costos de equipo de bombeo y energía eléctrica.

Es importante evitar que dentro del humedal se exceda el nivel máximo de inundación ya que provocaría la proliferación de mosquitos y la presencia de malos olores.

Se debe evitar tener contacto directo con los lodos ya que son infecto-contagiosos. En el Anexo A.19.2 se presenta, de manera prolija, la forma de manejar, tratar (estabilizar) y disponer de los residuos generados en este tipo de sistemas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En la construcción de humedales se debe considerar el tiempo de adaptación de las plantas a las condiciones climáticas. En este tiempo de adaptación se debe procurar que la zona de la rizosfera permanezca húmeda.

En el diseño de los humedales artificiales se recomienda hacer la caracterización del material que se empleará como soporte dentro del humedal. Esta caracterización debe incluir el tipo de material, tamaño de partícula, porosidad, altura por capa de sustrato, permeabilidad y compactación y debe realizarse considerando las condiciones climáticas del lugar en donde se pretendan construir este tipo de sistemas.

En el caso de contar con una cisterna de almacenamiento de agua tratada se debe procurar no almacenarla por periodos largos, ya que provocarían condiciones anóxicas y, por ende, provocar malos olores.

Cuando se diseña y construye una planta de tratamiento se hace pensando en economizar costos de construcción y operación, así como la comodidad de las personas que la van a operar, por lo que en estos sistemas también deben considerarse dichas actividades.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LA PLANTA PILOTO TIPO HAFVD

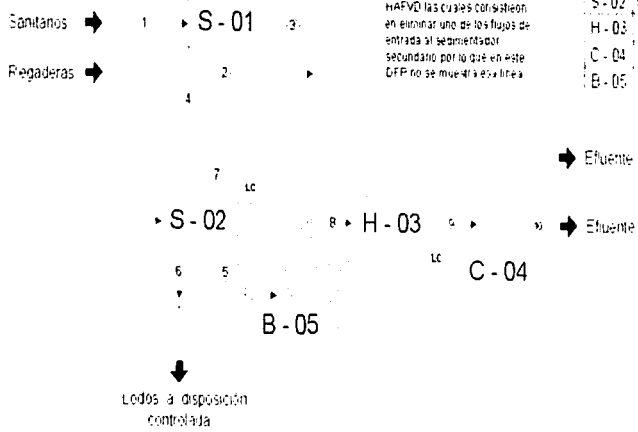
Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical

Lista de equipo

Clave	Equipo
S - 01	Sedimentador primario
S - 02	Sedimentador secundario
H - 03	HAFVD
C - 04	Sistema
B - 05	Bomba

Nota

El 12 de Julio del 2002 se realizaron modificaciones en el HAFVD las cuales consistieron en eliminar uno de los flujos de entrada al sedimentador secundario por lo que en este DFP no se muestra a esa línea



RESIS CON FALLA DE ORIGEN

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo [L/s]	2,400	3,000	2,400	5,400	400	5	4,995	400	400	400
Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental								Revisó	5/2003	CDB
Planta piloto tipo humedal artificial de flujo vertical descendente								Aprobó	5/2003	CDB

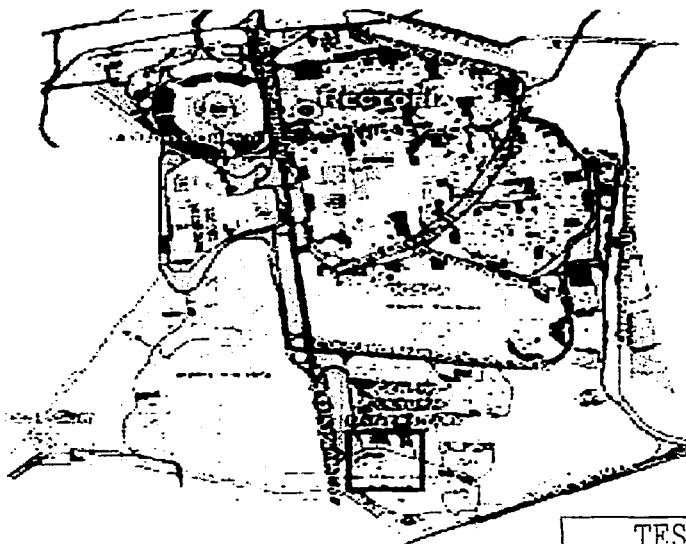
A.1 Diagrama de flujo de proceso del sistema de HAFVD

Elaboraron: Rodríguez Cruz Arturo, Varela Montellano Enaemo

Actualización # 2 (Enero 2003)



A.2 PLANO GENERAL DE UBICACIÓN DEL HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL DESCENDENTE



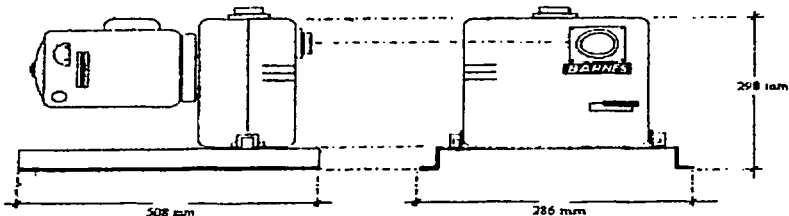
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Zona Cultural de UNAM (El recuadro indica la localización de la planta de tratamiento que usa el sistema de humedales artificiales de flujo vertical descendente en la parte sur de la Ciudad Universitaria, cercana a las Avenidas de los Insurgentes y del Imán)



**A.3 HOJA DE DATOS PARA LA BOMBA, TOMADA DE LOS DATOS
PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR
(DN = 1 ½, rpm = 3450, POTENCIA = ½ HP)**

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: 1.34 m ³ /h (354 G.P.H.)	
UNIDAD MOTRIZ: Eléctrica	NUM. 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"



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.4 HOJA DE DATOS PARA LA GEOMEMBRANA DE PPE, TOMADA DE LOS DATOS PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR

WATERSAVER
GUÍA DE ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA
.032 PPE 3200 S
 Polipropileno reforzado gris obscuro
 10 x 10 1000 resguardo de poliéster reforzado

PPE



PROPIEDAD	MÉTODO DE PRUEBA	VALOR TÍPICO
Calibre, nominal (mils)		32.0
Pliegues de refuerzo		1
Espesor, mínimo (mils)	ASTM D - 751 Método óptico	29.0
Tela con resistencia a la ruptura N (lbf)	ARTM D - 751 Método A	1000.85 (225)
Alargamiento, Mínimo (%)	ASTM D - 751 Método A	15
Temperatura baja, °C (°F)	ASTM D - 2136, 1/8" Mandril, 4 h.	-40 (-40)
Resistencia al goteo, Mínimo, N (lbf)	ASTM D - 751, Método G NSF Modificado	244.65 (55)
Resistencia a picaduras, Mínimo, N (lbf)	FTMS 101 C, Método 2031	934.17 (210)
Estabilidad dimensional	ND	ND
Resistencia hidrostática, Mínimo KPa (psi)	ASTM D - 751, Método A Procedimiento 1	2413.16 (350)
Adhesión por pliegue, Mínimo, N/m (lbf/in)	ASTM D - 413 Método en torno sobre modelo.	3502.54 (20)
Resistencia a UV	ASTM G - 26 Arco de Xenón @ 80°C	Pasa las 4000 h
Resistencia a la ruptura por fatiga, Mínimo (h c/o falla)	ASTM D - 1693 3000 h	Sin afectación por ESCR

Esta hoja de especificaciones cubren un refuerzo olefino de elastómero termoplástico, destinado en el uso como un revestimiento de seguridad en la contención de líquidos y desechos sólidos. Este revestimiento puede proveer servicios en muchas aplicaciones donde el grosor del material no sea requerido, o donde un material de refuerzo con alta resistencia a la deformación y/o una mejor conformabilidad en el estiramiento sea importante. Este producto es diseñado en un color gris/negro. El color es diseñado para un máximo de resistencia a los rayos UV y debe ser instalado con el color **GRIS HACIA ARRIBA**.

* Traducción de la hoja de datos original proporcionada por el proveedor

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



A.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LA PLANTA PILOTO TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL

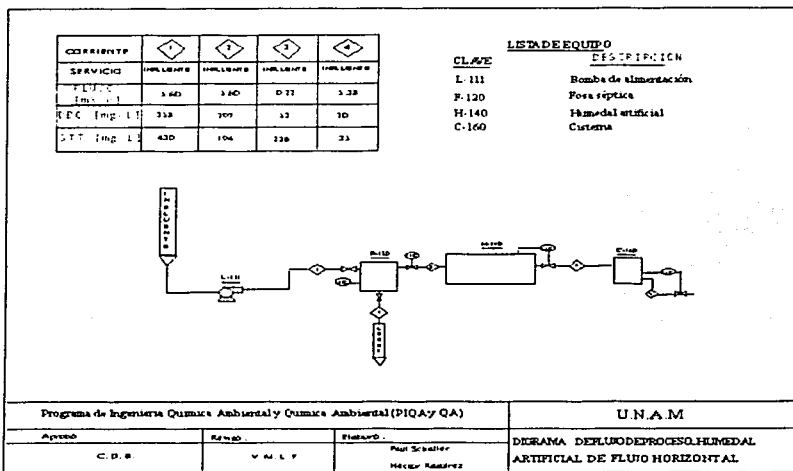


Figura A.5 Diagrama de flujo de proceso para el humedal artificial de flujo horizontal

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



A.8 INTERVALO DE VALORES FISICOQUÍMICOS PRESENTES EN EL RÍO MAGDALENA

Intervalo de valores fisicoquímicos que presenta el agua residual del Río Magdalena en la zona de los Viveros de Coyoacán y valores deseados para uso en riego agrícola con descarga a suelos, que establecen la Norma Oficial Mexicana NOM-SEMARNAT-001-1996 y la norma de Austria (Ramírez-Carrillo, 1998, p.32):

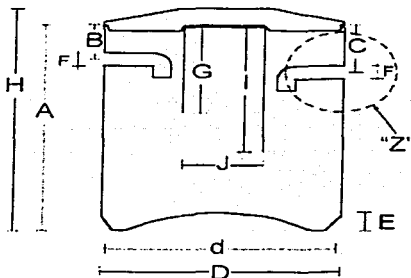
PARÁMETRO	Unidades	Agua residual	NOM-001-SEMARNAT-1996 (Lim. Máx. perm.)	Normatividad Austríaca
Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días	mg/L	210 - 350	120	30
Demanda química de oxígeno	mg/L	280 - 630	-	80
Sólidos totales	mg/L	250 - 430	120	50
Sólidos sedimentables	mg/L	0.5 - 3.2	-	-
Potencial de hidrógeno	Unidades	6.7 - 7.6	6.5 a 8.5	-
Temperatura	°C	16.3	-	-
Nitrógeno amoniacal	mg/L	2.5 - 7.0	-	10
Ortofosfato	mg/L	2.2 - 5.3	-	-
Nitrógeno Kjeldhal	mg/L	27 - 37	-	-
Conductividad eléctrica	µmho/cm	350 - 670	2000	800



A.9 HOJA DE DATOS DE LA FOSA SÉPTICA DEL HAFH

Eureka	
HOJA DE DATOS PARA LA FOSA SÉPTICA	
Capacidad nominal: 1846 L	Capacidad operación: 1500 L
Producto: agua residual	Densidad: 1099 kg/m ³
Pres. Op. Cuerpo: 86.18 kPa	Temp. Máx. Op: 35°C
Construcción	Datos de diseño mecánico
Tipo: cilindro vertical	Códigos: NOM-C-31-1983
>Diámetro: 151 cm	Material: fibrocemento reforzado
Altura: 184 cm	Aislamiento: ninguno
Espesor: 4 cm	Recubrimiento: ninguno
Tipo de tapa: cónica	Fabricación soldada: No
Soportes:	Corrosión Int: 0.9 mm
Cuello boquilla Ent: 12.6 cm	Corrosión Ext: 0.7 mm
Cuello boquilla Sal: 12.6 cm	Coef. Sísmico
Refuerzos	Peso vacío: 295 kg
Bridas: ninguna	Peso Operación: 2195 kg
Empaques	

Corte transversal



CAPACIDAD PARA 12 Y 15 PERSONAS

Considerando *50 L/persona/día establecidos en la NOM-C-31-1983

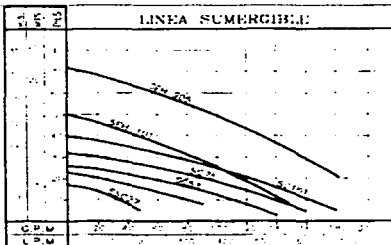
CAPACIDAD	
Lts	1846
PERSONAS	12/15
A	184.0 cm
B	127.0 cm
C	139.0 cm
D	151.0 cm
E	149.0 cm
F	120.0 cm
G	112.0 cm
H	170.0 cm
I	184.0 cm
J	150.0 cm
Peso	295 kg

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.10 HOJA DE DATOS DE LA BOMBA SUMERGIBLE DEL HAFH

Barnes Barmesa S. A.	
HOJA DE DATOS PARA LA BOMBA	
PROYECTO "VIVEROS DE COYOACÁN"	
Tipo: centrifuga sumergible	SE203 - SE101
Material a manejar: Aguas residuales	Capacidad requerida: 20 L/s
MATERIALES	
De la carcaza: Hierro fundido	Del cuerpo: Hierro fundido
Del impulsor: Hierro fundido	Del sello mecánico: Buna N, Acero Inoxidable
Del acople: Hierro fundido	De la base: Integrada al cuerpo
BOMBA	
Tipo de bomba: Centrifuga	Tipo de acople: Monobloque
Tipo de impulsor: Semiabierto, de dos álabes	Diámetro de succión: Según modelo
Diámetro de descarga: Según modelo	Temp. de operación max. 70°C
Montada sobre: Base propia	
MOTOR	
Tipo: Eléctrico sumergido en aceite	Potencia: 0.4 a 2.0 HP
Voltaje: 110V ó 220V	Refrigeración: Por aceite dieléctrico
Velocidad: 1750 ó 3450 R.P.M	Frecuencia: 60 ciclos
No. de fases: 1 ó 3 según modelo	



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Quando se trata de manejar aguas negras, su impulsor semiabierto inatascable permite el bombeo de aguas con sólidos en suspensión sin partículas abrasivas. Se fabrica con motores de 1750 rpm para reducir el desgaste por efectos de la abrasión propia de las aguas residuales, disponible en potencias de 0.4 HP hasta 2.0 HP, si se desea cabezas mayores hay modelos a 3450 rpm en 1.0 HP y 2.0 HP



A.11 TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL, DQOT

La técnica empleada se basa en una oxidación enérgica de la materia orgánica e inorgánica oxidable, que se encuentra en el agua en un medio fuertemente ácido (APHA-AWWA-WPCF, 1989).

(i) Reactivos

Solución digestora

$K_2Cr_2O_7$	10.216g
$HgSO_4$	33.3g
H_2SO_4 concentrado	167 mL
	en 1L de agua destilada

Solución H_2SO_4 concentrada

Ag_2SO_4	3.12 g
	en 1L de H_2SO_4

(ii) Equipo y material

Horno Gravity Convection Oven modelo 16 EG

Centrífuga INTERNATIONAL CENTRIFUGE

Espectrofotómetro Spectronic 21D

Tubos con rosca

Tubos para centrífuga

Pipeta volumétrica 2mL

Gradilla

Propipeta

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(iii) Procedimiento

Colocar 2mL de muestra perfectamente mezclada

Testigo con 2mL de agua destilada

Agregar 1mL de solución digestora ($K_2Cr_2O_7$, $HgSO_4$, H_2SO_4)

Agregar 3mL de H_2SO_4 concentrado / Ag_2SO_4

Agitar

Digestión por 30 minutos a reflujo cerrado a $165^\circ C$

Enfriar

Centrifugar 30 minutos

Determinación fotométrica a 600 nm

Calcular concentración de acuerdo a la curva de calibración

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.12 TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES, SS

Esta técnica está basada en la medición desarrollada por Imhoff en Alemania (APHA–AWWA–WPCF, 1989).

El equipo requerido es el siguiente:

- 1 Soporte universal.
- 1 Aro metálico.
- 1 Cono Imhoff.



Figura A.12.1. Equipo usado en la determinación de sólidos sedimentables



Figura A.12.2. Realización de la técnica de sólidos sedimentables

El procedimiento es el siguiente:

Se llena un cono Imhoff hasta la marca 1 L con una muestra bien mezclada, se deja sedimentar durante 45 minutos, removiendo a continuación suavemente las paredes del cono con una varilla o mediante rotación:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Se mantiene en reposo 15 minutos más y se registra el volumen de sólidos sedimentables del cono como mililitros por litro [mL/L].



Figura A.12.3. Precipitación de sólidos en el cono Imhoff

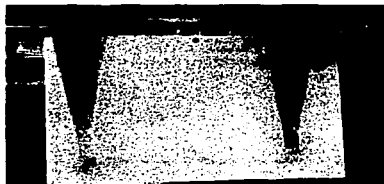


Figura A.12.4. Vista general de la técnica de sólidos sedimentables

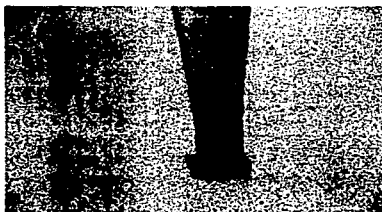


Figura A.12.5. Precipitación de sólidos después de 15 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.13 TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE pH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, OXÍGENO DISUELTUO, SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES USANDO EQUIPOS DE CAMPO

El equipo de campo usado en esta investigación para determinar conductividad eléctrica, pH, temperatura y sólidos disueltos totales se presenta en la Figura A.13.1.

COMPONENTES DEL EQUIPO DE MUESTREO EN CAMPO

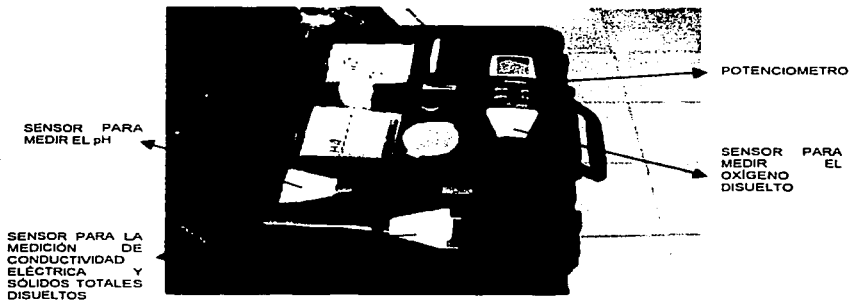


Figura A.13.1. Equipo de muestreo en campo utilizado para tomar lecturas de los parámetros fisicoquímicos

Procedimiento para la lectura de los parámetros fisicoquímicos

1. Toma de muestras

Antes de tomar la muestra se debe enjuagar el recipiente varias veces con el agua de muestra, la muestra que se toma debe de ser representativa y homogénea.

Especificaciones del recipiente de muestreo: El recipiente debe de ser de plástico con tapa roscada y boca ancha (limpio), de preferencia se deben de utilizar bolsas de muestreo y un par de guantes de látex.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



2. Toma de lecturas

(i) Para efectuar la lectura del pH

- a) Instalar el sensor
- b) Fijar las puntas del conector en el medidor y empujar firmemente en el medidor. El medidor se remueve sosteniéndolo firmemente de la parte trasera y jalando el sensor hacia abajo
- c) Insertar el sensor de pH en el medidor
- d) Quitar la capucha humedecedora del sensor
- e) Enjuagar el sensor con agua destilada, secar con un trapo suave y seco
- f) Sumergir el sensor en la muestra homogénea de agua a medir
- g) Agitar la muestra a una velocidad constante (aproximadamente 20 cm/s) cuando se hagan mediciones
- h) Presionar el botón MODE, READ, CAL o M para encender el medidor y empezar la medición. Con todos los sensores se puede determinar la temperatura de la muestra
- i) La detección del punto final "congelará" el valor en pantalla cuando esté estable
- j) Anotar la lectura para el pH
- k) Si se requiere hacer otra medición repetir los pasos desde el inciso f hasta el inciso i (anotando el valor proporcionado por el medidor en bitácora), una vez

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



que hayan terminado las lecturas no debe olvidarse apagar el medidor oprimiendo dos veces la tecla MODE

(ii) Lecturas para conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT)

La lectura de la CE se realiza con el sensor respectivo, presionando la tecla MODE se entra a la segunda función del sensor y es ahí donde se efectúa la lectura de los SDT.

- a) Insertar el sensor de CE en el medidor
- b) Enjuagar el sensor con agua destilada, secando con un trapo suave y seco
- c) Sumergir el sensor en la muestra homogénea de agua a medir
- d) Agitar la muestra a una velocidad constante (aproximadamente 20 cm/s) cuando se hagan mediciones
- e) Presionar el botón MODE, READ, CAL o M para encender el medidor y empezar la medición. Con todos los sensores se puede determinar la temperatura de la muestra
- f) La detección del punto final "congelará" el valor en pantalla cuando esté estable
- g) Anotar la lectura de la CE
- h) Si se requiere hacer otra medición se deben repetir los pasos desde el inciso c hasta el inciso g (anotando el valor proporcionado por el medidor en bitácora), una vez que se hayan terminado las lecturas no debe olvidarse apagar el medidor oprimiendo dos veces la tecla MODE.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para medir el oxígeno disuelto se usó el equipo de campo marca HACH. Su funcionamiento se describe a continuación.

1. Conectar el sensor en la ranura correspondiente para el mismo
2. Encender el equipo con la perilla 2 y colocarlo en la posición de BATT CHECK
3. Colocar la perilla 2 en la posición de OPERATE
4. Mover la perilla 4 hasta la posición marcada como ZERO
5. Poner a cero el equipo moviendo la perilla 1 marcada con la leyenda ZERO



6. Colocar la perilla 4 en la marca indicada como TEMP., tomar la temperatura
7. Con la temperatura obtenida en el paso 6, y con la ayuda de la tabla de corrección por temperatura y presión que se observa al abrir el maletín, se realiza una extrapolación para obtener los valores a la presión en la Ciudad de México, se calibra el equipo en base al resultado obtenido de la extrapolación
8. Mover nuevamente la perilla 4 hasta la escala marcada con el intervalo 0 a 10 y la calibración se efectúa moviendo la perilla 3 marcado como CALIBRATE, hasta el valor extrapolado
9. Introducir el sensor en la muestra hasta que la aguja del equipo se estabilice, si se tiene más de una muestra se recomienda enjuagar el sensor con agua destilada varias veces antes de sumergirlo en la muestra siguiente
10. Después de utilizar el equipo se debe verificar que el capuchón de protección esté húmedo, de lo contrario humedecerlo con unas gotas de agua destilada, insertar dicho capuchón en el sensor y apagar el equipo, desconectando el sensor.

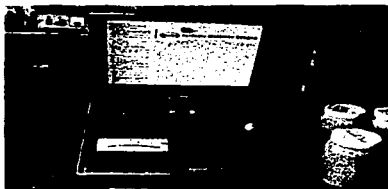


Figura A.13.2. Equipo HACH usado para medir el oxígeno disuelto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.14 PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO_t

Para elaborar la curva de calibración, se disuelven 680 mg de hidrógenoftalato de potasio ($C_8H_5KO_4$) previamente secado en agua destilada y aforar a un litro (solución estándar madre). El hidrógenoftalato de potasio ($C_8H_5KO_4$) se seca en una estufa a $110^{\circ}C$.

Esta solución presenta una DQO teórica de 800 mg O_2/L y a partir de ésta se preparan una serie de soluciones patrón o estándar en un intervalo que oscile entre 20–800 mg O_2/L .

La Tabla A.14.1 presenta los mL de solución estándar madre utilizados para la elaboración de las soluciones estándar, requeridas para la preparación de la curva de calibración, así como también los mL de agua destilada utilizados para llevar a un volumen de 100 mL todas las muestras preparadas.

Tabla A.14.1. Cantidades de solución estándar madre y agua destilada utilizadas para la elaboración de la curva de calibración

No. de estándar	Concentración teórica [mg O_2/L]	$C_8H_5KO_4$ [mL]	Agua destilada [mL]
1	0	0.00	100.0
2	10	1.25	98.75
3	50	6.25	93.75
4	100	12.5	87.50
5	200	25.0	75.0
6	300	37.5	62.50
7	400	50.0	50.0
8	600	75.0	25.0
9	700	87.5	12.50
10	800	100	0.00



Estas soluciones estándar se someten a digestión, a las condiciones establecidas en el Anexo A.11, referente a la elaboración de la técnica de DQO.

Concluido el proceso de digestión de las soluciones estándar, se deja enfriar y posteriormente se efectúan lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro UV-Visible, en el intervalo de longitud de onda de 580 a 620 nm.

Los datos obtenidos en la realización de la curva de calibración son tabulados y graficados, a su vez se obtiene una ecuación de tendencia que proporciona, mediante un cálculo, la concentración de DQO. Ver el Anexo A.15.

Las Figuras A.14.1 y A.14.2 muestran los tubos con las soluciones patrón antes y después de la digestión.



Figura A.14.1. Preparación de muestras para su digestión



Figura A.14.2. Muestras después de la digestión

Se nota que existe en los tubos mostrados en la Figura A.14.2 un cambio de coloración muy marcado. Esto es debido a las diferentes concentraciones de DQO existentes en cada uno de los tubos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.15 CURVAS DE CALIBRACIÓN USADAS DURANTE EL PERIODO EXPERIMENTAL

Durante el periodo experimental se elaboraron 6 curvas de calibración, con ellas y su respectiva ecuación se calculó la DQOt, para todas las muestras de ambos humedales.

Curvas de calibración

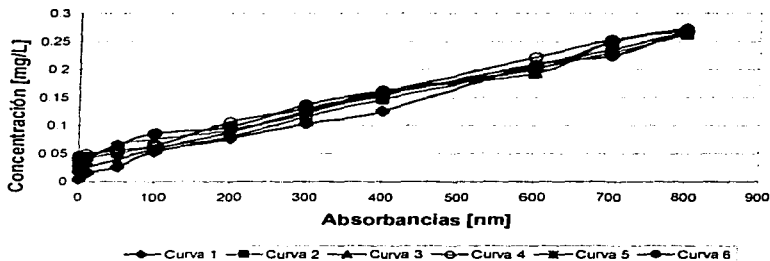


Tabla A.15.1. Curvas de calibración y ecuaciones de regresión

Curvas	Ecuación de regresión resultante
Curva 1	$Y = 3149.5 \cdot x - 31.732$ $R^2 = 0.9942$
Curva 2	$Y = 3469.2 \cdot x - 104.13$ $R^2 = 0.9956$
Curva 3	$Y = 3473.3 \cdot x - 140.05$ $R^2 = 0.9882$
Curva 4	$Y = 3419.3 \cdot x - 147.11$ $R^2 = 0.9972$
Curva 5	$Y = 3293.2 \cdot x - 88.298$ $R^2 = 0.998$
Curva 6	$Y = 3589.6 \cdot x - 174.1$ $R^2 = 0.9925$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



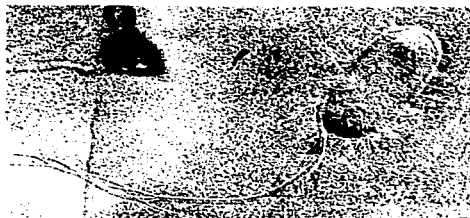
A.16 AGENTES POTENCIALMENTE INFECCIOSOS PRESENTES EN EL AGUA RESIDUAL

Tabla A.16.1. Agentes potencialmente infecciosos presentes en el agua residual doméstica (Metcalf y Eddy, 1991)

ORGANISMO	ENFERMEDAD	SÍNTOMAS
Bacterias		
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógeno)	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Enfermedad respiratoria aguda
<i>Leptospira</i> (150 spp.)	Leptospirosis	Fiebre ictericia, enfermedad de Weil
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, diarrea, ulceración del intestino delgado
<i>Salmonella</i> (~ 1700 spp.)	Salmonelosis	Envenenamiento de alimentos
<i>Shigella</i> (4 spp.)	Shigelosis	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarrea extremadamente alta, deshidratación
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis	Diarrea
Virus		
Adenovirus (31 tipos)	Enfermedades respiratorias	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; display: inline-block;"> <p>TESIS CON FALLA DE ORIGEN</p> </div>
Enterovirus (67 tipos, e.g., polio, echo y virus Cocksackie)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosa	
Agente Norwalk	Gastroenteritis	
Reovirus	Gastroenteritis	
Rotavirus	Gastroenteritis	



Protozoarios		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium</i>	Cryptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amibiasis (desinteria amibica)	Diarrea prolongada, con sangrado, abscesos en el hígado y el intestino delgado
<i>Lambliia intestinalis</i>	Giardiasis	Diarrea ligera a severa, náuseas e indigestión
Helmintos		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infestación de ascárides
<i>Enterobius vericularis</i>	Enterobiasis	Lombrices
<i>Fasciola hepatica</i>	Fascioliasis	Duela del hígado de carnero
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiasis	Solitaria pequeña
<i>Taenia saginata</i>	Taeniasis	Solitaria de la carne de res
<i>T. solium</i>	Taeniesis	Solitaria del cerdo
<i>Trichuris trichuria</i>	Trichuriasis	Lombriz alargada



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.16.1. Microfotografía de la bacteria *E. coli* (Metcalf y Eddy, 1991)



A.17 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA EL HAFVD

A.17.1 Valor de pH

Datos	Fecha	Entradas	Salidas
1	12/Feb /2002	6.96	6.86
2	14/Feb /2002	6.77	
3	19/Feb /2002	7.12	7.15
4	21/Feb /2002	7.06	7.18
5	26/Feb /2002	7.24	7.11
6	28/Feb /2002	7.19	7.19
7	5/Mar /2002	7.32	7.37
8	12/Mar /2002	7.27	7.37
9	14/Mar /2002	7.18	7.23
10	19/Mar /2002	7.24	6.97
11	2/Abr /2002	7.27	7.32
12	4/Abr /2002	7.29	7.36
13	9/Abr /2002	7.02	7.1
14	11/Abr /2002	6.95	7.25
15	16/Abr /2002	7.35	7.23
16	18/Abr /2002	7.24	7.4
17	23/Abr /2002	7.11	7.45
18	25/Abr /2002	7.02	7.19
19	30/Abr /2002	6.86	7.07
20	2/May /2002	6.72	7.22
21	6/May /2002	6.73	7.28
22	8/May /2002	6.98	7.02
23	13/May /2002	7.16	7.05
24	20/May /2002	7.13	7.06
25	22/May /2002	7.32	7.01
26	4/Jun /2002	7.58	7.53
27	6/Jun /2002	7.52	7.63
28	11/Jun /2002	7.4	7.37
29	9/Jul /2002	7.41	7.55
30	16/Jul /2002	7.3	7.04
31	18/Jul /2002	7.37	7.08
32	23/Jul /2002	7.54	7.09
33	3/Sep /2002	7.37	6.87
34	5/Sep /2002	7.44	7.06
35	17/Sep /2002	7.61	7.18
36	19/Sep /2002	7.57	7.01
37	24/Sep /2002	8.16	7.88
38	1/Oct /2002	7.85	7.05
39	3/Oct /2002	7.71	6.98
40	8/Oct /2002	7.9	7.15
41	15/Oct /2002	8.01	7.32
42	17/Oct /2002	7.48	6.69
43	22/Oct /2002	7.58	6.95
44	24/Oct /2002	7.38	6.35
45	29/Oct /2002	7.34	6.37
46	5/Nov /2002	7.18	6.76

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.17.2 Temperatura (°C)

Datos	Días	Entradas	Salidas	Ambiente
1	12/Feb./2002	18.6	18.9	
2	14/Feb./2002	24		
3	19/Feb./2002	23.2	18.3	
4	21/Feb./2002	24.1	16.7	
5	26/Feb./2002	20	16.8	
6	28/Feb./2002	21.2	17.8	
7	5/Mar./2002	21.3	17.1	
8	12/Mar./2002	23.1	17.7	
9	14/Mar./2002	27.9	18	
10	19/Mar./2002	28.3	23	
11	2/Abr./2002	29.7	18.9	
12	4/Abr./2002	23.5	22	
13	9/Abr./2002	29.3	20.6	
14	11/Abr./2002	22.5	19.3	
15	16/Abr./2002	26.5	18.9	
16	18/Abr./2002	20.6	20.8	
17	23/Abr./2002	25.8	20.8	
18	25/Abr./2002	24.7	22.2	
19	30/Abr./2002	29	23.8	
20	2/May./2002	26.9	25.4	
21	6/May./2002	26	21	
22	8/May./2002	23	21	
23	13/May./2002	31	22	
24	20/May./2002	23	21	
25	22/May./2002	23	20	
26	4/Jun./2002	28	20	25
27	6/Jun./2002	24	20	26
28	11/Jun./2002	24	20	23
29	9/Jul./2002	19	20	22.5
30	16/Jul./2002	20	19	22
31	18/Jul./2002	23	19.5	22
32	23/Jul./2002	18.5	19	18
33	3/Sep./2002	23	19.5	24
34	5/Sep./2002	22	20	24.5
35	17/Sep./2002	19	20	24
36	19/Sep./2002	23	20.5	24.5
37	24/Sep./2002	19	19.5	17.2
38	1/Oct./2002	22	19.5	22
39	3/Oct./2002	24	19	29
40	8/Oct./2002	21	20	23.5
41	15/Oct./2002	20	19	24
42	17/Oct./2002	22	19	24
43	22/Oct./2002	23	19.5	25
44	24/Oct./2002	22	19	23.5
45	29/Oct./2002	19.5	19	19
46	5/Nov./2002	22	19	23

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.17.3 Conductividad eléctrica (micro mho/cm)

Datos	Fechas	Entradas	Salidas
1	12/Feb./2002	13190	13110
2	14/Feb./2002	13510	
3	19/Feb./2002	1390	1135
4	21/Feb./2002	1429	1148
5	26/Feb./2002	1490	1141
6	28/Feb./2002	1474	1180
7	5/Mar./2002	1580	1117
8	12/Mar./2002	1539	1149
9	14/Mar./2002	1276	1215
10	19/Mar./2002	1313	1276
11	2/Abr./2002	1407	1280
12	4/Abr./2002	1200	1300
13	9/Abr./2002	1425	1353
14	11/Abr./2002	1152	1329
15	16/Abr./2002	1265	1249
16	18/Abr./2002	1286	1280
17	23/Abr./2002	1427	1139
18	25/Abr./2002	2130	1937
19	30/Abr./2002	2360	1990
20	2/May./2002	2170	1990
21	6/May./2002	2650	2030
22	8/May./2002	1606	2460
23	13/May./2002	2070	3060
24	20/May./2002	2270	2160
25	22/May./2002	1973	2350
23	4/Jun./2002	1572	2840
27	6/Jun./2002	1980	2950
28	11/Jun./2002	2010	3430
29	9/Jul./2002	1195	3160
30	16/Jul./2002	2110	2710
31	18/Jul./2002	1980	2700
32	23/Jul./2002	1779	2390
33	3/Sep./2002	1493	1962
34	5/Sep./2002	606	2480
35	17/Sep./2002	1612	1738
36	19/Sep./2002	1942	1778
37	24/Sep./2002	2040	1338
38	1/Oct./2002	1261	877
39	3/Oct./2002	1238	849
40	8/Oct./2002	827	903
41	15/Oct./2002	1210	779
42	17/Oct./2002	1213	800
43	22/Oct./2002	1325	924
44	24/Oct./2002	1130	841
45	29/Oct./2002	1542	903
46	5/Nov./2002	1508	952

REGIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.17.4 Sólidos disueltos totales, SDT (mg/L)

Datos	Fechas	Entradas	Salidas
1	12/Feb./2002	6760	6580
2	14/Feb./2002	6740	
3	19/Feb./2002	696	570
4	21/Feb./2002	715	576
5	26/Feb./2002	749	573
6	28/Feb./2002	739	592
7	5/Mar./2002	796	571
8	12/Mar./2002	773	578
9	14/Mar./2002	638	614
10	19/Mar./2002	650	640
11	2/Abr./2002	704	643
12	4/Abr./2002	595	650
13	9/Abr./2002	716	682
14	11/Abr./2002	579	665
15	16/Abr./2002	638	629
16	18/Abr./2002	644	642
17	23/Abr./2002	709	571
18	25/Abr./2002	1060	971
19	30/Abr./2002	1150	990
20	2/May./2002	1080	1010
21	6/May./2002	1310	1020
22	8/May./2002	806	1250
23	13/May./2002	1040	1570
24	20/May./2002	1120	1070
25	22/May./2002	991	1180
26	4/Jun./2002	790	1410
27	6/Jun./2002	994	1480
28	11/Jun./2002	1000	1690
29	9/Jul./2002	597	1600
30	16/Jul./2002	1050	1350
31	18/Jul./2002	984	1340
32	23/Jul./2002	892	1200
33	3/Sep./2002	746	984
34	5/Sep./2002	307	1240
35	17/Sep./2002	804	866
36	19/Sep./2002	976	894
37	24/Sep./2002	1010	670
38	1/Oct./2002	630	441
39	3/Oct./2002	615	424
40	8/Oct./2002	409	454
41	15/Oct./2002	601	386
42	17/Oct./2002	602	402
43	22/Oct./2002	664	465
44	24/Oct./2002	568	423
45	29/Oct./2002	777	457
46	5/Nov./2002	751	477

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.17.5 Oxígeno disuelto (mg O₂/L)

Datos	Fechas	Entradas	Salidas
1	12/Feb./2002	0.6	1
2	30/Abr./2002	0.24	1.2
3	2/May./2002	0.2	2.1
4	6/May./2002	0.4	2.2
5	8/May./2002	0.2	0.2
6	13/May./2002	0.3	0.65
7	20/May./2002	0.2	1.2
8	22/May./2002	0.4	1.4
9	4/Jun./2002	0.2	0.8
10	6/Jun./2002	0.3	1.4
11	11/Jun./2002	0.5	1.2
12	9/Jul./2002	0.4	0.6
13	16/Jul./2002	0.3	1
14	18/Jul./2002	0.3	1.7
15	23/Jul./2002	0.2	1.8
16	3/Sep./2002	0.5	1.8
17	5/Sep./2002	0.6	2.2
18	17/Sep./2002	0.7	2.8
19	19/Sep./2002	0.6	2.8
20	24/Sep./2002	0.7	2.8
21	1/Oct./2002	0.6	2.6
22	3/Oct./2002	0.7	2.4
23	8/Oct./2002	0.7	1.8
24	15/Oct./2002	1.2	2.2
25	17/Oct./2002	0.4	2.4
23	22/Oct./2002	0.5	2.4
27	24/Oct./2002	0.6	2.8
28	29/Oct./2002	0.7	3
29	5/Nov./2002	0.4	2.5

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.17.6 Demanda química de oxígeno total, DQO_{tot} (mg/L)

DQO tot	Entradas	Salidas	% de remoción
12/Feb./2002	944 592	525 7351	44 3426262
19/Feb./2002	858 511133	140 470733	83 637867
21/Feb./2002	834 3665	136 79655	83 6047408
26/Feb./2002	882 655767	232 8502	73 6193646
28/Feb./2002	942 492467	310 00805	67 1076363
5/Mar./2002	881 606	144 6698	83 5901979
19/Mar./2002	732 539133	139 94585	80 8957851
2/Abr./2002	752 7624	78 003	89 6377662
9/Abr./2002	830 2412	88 4106	89 351215
11/Abr./2002	763 17	138 714	81 8239711
16/Abr./2002	755 0752	97 0836	87 1425257
18/Abr./2002	640 5916	80 894	87 3719855
23/Abr./2002	788 6108	65 8608	91 6485039
30/Abr./2002	763 17	57 1878	92 5065451
2/May./2002	797 862	62 3916	92 1801515
6/May./2002	807 1132	117 8988	85 3925323
8/May./2002	523 7952	185 5482	64 5761931
13/May./2002	629 6058	234 117	62 8153044
20/May./2002	553 2834	91 8798	83 3937183
22/May./2002	561 9564	100 5528	82 1066545
30/May./2002	497 879433	66 61135	86 6209878
4/Jun./2002	413 94135	127 3941	69 2241183
6/Jun./2002	691 80535	115 23755	83 3424893
11/Jun./2002	471 2508	91 5033333	80 58288
9/Jul./2002	426 0979	242 013	43 2024894
16/Jul./2002	442 306633	44 0349	90 0442596
18/Jul./2002	463 23505	170 8849	63 1105418
23/Jul./2002	326 46305	50 0696333	84 6630014
3/Sep./2002	445 2004	143 8726	67 6836319
17/Sep./2002	387 5694	148 8124	61 6036767
19/Sep./2002	385 9228	133 444133	65 4220654
24/Sep./2002	472 643733	137 835067	70 8374285
1/Oct./2002	496 245	137 2862	72 3349958
3/Oct./2002	394 1558	76 362	80 6264426
8/Oct./2002	352 9908	122 4668	65 3059513
15/Oct./2002	662 5516	112 5872	83 0070292
17/Oct./2002	466 6062	193 819467	58 461875
22/Oct./2002	494 5984	234 4356	52 6008171
29/Oct./2002	506 1292	82 5564	83 6886708
5/Nov./2002	360 7504	48 4552	86 56822

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A. 17.7 Porcentajes de remoción de DQO_{tot} del HAFVD

Promedios hasta el 8 de Mayo del 2002

Primer flujo

Promedio de valores de DQO _{tot} .	
Entradas	794.067918
Salida	153.086393

% de remoción = 80.7212469

Promedios a partir del 13 de Mayo del 2002 al 5 de Noviembre de 2002

Segundo flujo

Promedio de valores de DQO _{tot} .	
Entradas	474.051691
Salida	126.357888

% de remoción = 73.3451244

Promedios generales del 12 de Febrero del 2002 al 5 de Noviembre del 2002

Promedio de valores de DQO _{tot} .	
Entradas	610.058588
Salida	137.717503

% de remoción = 77.425583

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.18 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA EL HAFH

A.18.1 Valor de pH

DATOS	FECHA	ENTRADA	SALIDA
1	Feb-11-2002	6.69	6.9
2	Feb-13-2002	7.5	7.25
3	Feb-18-2002	7	7.06
4	Feb-20-2002	7.47	7.25
5	Feb-25-2002	7.42	7.24
6	Feb-27-2002	7.19	7.19
7	Mar-4-2002	7.5	7.33
8	Mar-7-2002	7.21	7.26
9	Mar-11-2002	7.1	7.08
10	Mar-19-2002	7.18	7.13
11	Abr-1-2002	7.08	7.05
12	Abr-4-2002	7.35	7.18
13	Abr-8-2002	7.16	7.27
14	Abr-10-2002	7.11	6.96
15	Abr-15-2002	7.31	6.88
16	Abr-18-2002	7.13	7.52
17	Abr-23-2002	7.1	6.929
18	Abr-25-2002	6.71	6.93
19	Abr-30-2002	7.11	6.91
20	May-2-2002	6.83	6.87
21	May-6-2002	7.09	7.07
22	May-8-2002	7.16	7.14
23	May-13-2002	7.05	7.1
24	May-20-2002	7.21	6.98
25	May-22-2002	7.29	7.15
26	Jun-4-2002	7.28	7.62
27	Jun-6-2002	7.33	7.41
28	Jun-11-2002	7.21	7.48
29	Jul-4-2002	7.46	7.31
30	Jul-9-2002	7.53	7.35
31	Jul-16-2002	6.96	6.69
32	Jul-18-2002	6.98	6.67
33	Jul-23-2002	7.15	6.96
34	Sep-3-2002	6.96	6.99
35	Sep-5-2002	7.04	6.78
36	Sep-19-2002	7	7
37	Sep-24-2002	7.8	7.6
38	Oct-1-2002	7.26	7.04
39	Oct-3-2002	7.62	7.08
40	Oct-8-2002	7.36	7.3
41	Oct-15-2002	7.34	7.48
42	Oct-17-2002	7	6.85
43	Oct-22-2002	7.14	6.94
44	Oct-24-2002	6.71	6.54
45	Oct-29-2002	6.66	6.11
46	Nov-5-2002	7.15	6.74



A.18.2 Temperatura (°C)

Día	FECHA	ENTRADA	SALIDA	AMBIENTE
1	Feb-11-2002	15.8	15.4	
2	Feb-13-2002	17.7	15.2	
3	Feb-18-2002	18	15.7	
4	Feb-20-2002	20.7	17.2	
5	Feb-25-2002	17.1	16.4	
6	Feb-27-2002	17.8	21.2	
7	Mar-4-2002	22.6	20.5	
8	Mar-7-2002	22.12	21.3	
9	Mar-11-2002	19	17	
10	Mar-19-2002	21.2	19.7	
11	Abr-1-2002	21	19.4	
12	Abr-4-2002	22.8	21.4	
13	Abr-8-2002	22	20.6	
14	Abr-10-2002	15	14.8	
15	Abr-15-2002	18.2	17.1	
16	Abr-18-2002	20.9	20.6	
17	Abr-23-2002	22.1	20	
18	Abr-25-2002	23.1	22.5	
19	Abr-30-2002	25	24.7	
20	May-2-2002	26.4	25.3	
21	May-6-2002	21.5	20	
22	May-8-2002	21	19.9	
23	May-13-2002	22	19	
24	May-20-2002	19.5	17.5	
25	May-22-2002	20	17	
26	Jun-4-2002	19	18	23
27	Jun-6-2002	20	17.5	22
28	Jun-11-2002	19	18	17
29	Jul-4-2002	19	18	17
30	Jul-9-2002	18.5	17	16
31	Jul-16-2002	19	17	18.5
32	Jul-18-2002	18.5	17	20
33	Jul-23-2002	17	17	17
34	Sep-3-2002	19.5	18.2	21
35	Sep-5-2002	19	17	18
36	Sep-19-2002	18	17.5	26.5
37	Sep-24-2002	16	17	17
38	Oct-1-2002	18	16	19
39	Oct-3-2002	18	16.5	21
40	Oct-8-2002	18	16	16.5
41	Oct-15-2002	18	17	19
42	Oct-17-2002	18	16	19
43	Oct-22-2002	17	16.5	20
44	Oct-24-2002	17	16	21
45	Oct-29-2002	18	16.5	22
46	Nov-5-2002	17.5	16	19.5



A.18.3 Conductividad eléctrica (micro mho/cm)

DATOS	FECHA	ENTRADA	SALIDA
1	Feb-11-2002	7110	9230
2	Feb-13-2002	5010	6060
3	Feb-18-2002	6930	7730
4	Feb-20-2002	730	777
5	Feb-25-2002	701	751
6	Feb-27-2002	1180	1474
7	Mar-4-2002	7900	8240
8	Mar-7-2002	826	681
9	Mar-11-2002	899	691
10	Mar-19-2002	751	724
11	Abr-1-2002	684	885
12	Abr-4-2002	725	804
13	Abr-8-2002	819	778
14	Abr-10-2002	680	697
15	Abr-15-2002	690	664
16	Abr-18-2002	695	672
17	Abr-23-2002	647	715
18	Abr-25-2002	1650	1275
19	Abr-30-2002	1371	1312
20	May-2-2002	1512	1286
21	May-6-2002	1485	1311
22	May-8-2002	1130	1321
23	May-13-2002	1201	1464
24	May-20-2002	1217	1315
25	May-22-2002	1248	1352
26	Jun-4-2002	1169	1414
27	Jun-6-2002	1128	1431
28	Jun-11-2002	1056	1462
29	Jul-4-2002	1026	1459
30	Jul-9-2002	1013	1255
31	Jul-16-2002	1046	921
32	Jul-18-2002	812	867
33	Jul-23-2002	773	898
34	Sep-3-2002	1154	985
35	Sep-5-2002	1169	931
36	Sep-19-2002	855	791
37	Sep-24-2002	825	844
38	Oct-1-2002	450	454
39	Oct-3-2002	503	477
40	Oct-8-2002	532	432
41	Oct-15-2002	554	490
42	Oct-17-2002	518	460
43	Oct-22-2002	555	460
44	Oct-24-2002	539	555
45	Oct-29-2002	634	566
46	Nov-5-2002	649	601

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.18.4 Sólidos disueltos totales, SDT (mg/L)

DATOS	FECHA	ENTRADA	SALIDA
1	Feb-11-2002	0	0
2	Feb-13-2002	2700	3050
3	Feb-18-2002	387	404
4	Feb-20-2002	347	390
5	Feb-25-2002	348	375
6	Feb-27-2002	592	739
7	Mar-4-2002	4040	4160
8	Mar-7-2002	411	341
9	Mar-11-2002	452	347
10	Mar-19-2002	380	363
11	Abr-1-2002	344	444
12	Abr-4-2002	361	404
13	Abr-8-2002	413	389
14	Abr-10-2002	340	346
15	Abr-15-2002	347	331
16	Abr-18-2002	352	337
17	Abr-23-2002	324	361
18	Abr-25-2002	830	641
19	Abr-30-2002	685	656
20	May-2-2002	756	644
21	May-6-2002	738	654
22	May-8-2002	566	663
23	May-13-2002	603	736
24	May-20-2002	604	655
25	May-22-2002	629	679
26	Jun-4-2002	583	710
27	Jun-6-2002	567	719
28	Jun-11-2002	526	732
29	Jul-4-2002	515	726
30	Jul-9-2002	507	628
31	Jul-16-2002	525	465
32	Jul-18-2002	403	437
33	Jul-23-2002	388	450
34	Sep-3-2002	575	493
35	Sep-5-2002	590	467
36	Sep-19-2002	431	396
37	Sep-24-2002	412	423
38	Oct-1-2002	227	222
39	Oct-3-2002	254	240
40	Oct-8-2002	269	218
41	Oct-15-2002	274	244
42	Oct-17-2002	262	232
43	Oct-22-2002	281	232
44	Oct-24-2002	273	276
45	Oct-29-2002	324	283
46	Nov-5-2002	322	302



A.18.5 Oxígeno disuelto (mg O₂/L)

DATOS	FECHA	ENTRADA	SALIDA
1	Abr-30-2002	0.2	0.6
2	May-2-2002	0.4	1.1
3	May-6-2002	0.4	0.5
4	May-8-2002	0.3	0.7
5	May-13-2002	0.2	0.4
6	May-20-2002	0.3	0.6
7	May-22-2002	0.2	2.4
8	Jun-4-2002	0.2	1.2
9	Jun-6-2002	0.2	1.6
10	Jun-11-2002	0.6	1.6
11	Jul-4-2002	0.4	1
12	Jul-9-2002	0.6	1.2
13	Jul-16-2002	0.2	0.6
14	Jul-18-2002	0.4	1
15	Jul-23-2002	0.4	1
16	Sep-3-2002	0.4	2.2
17	Sep-5-2002	0.5	1.7
18	Sep-19-2002	0.4	1.8
19	Sep-24-2002	1.5	1.9
20	Oct-1-2002	0.4	2.4
21	Oct-3-2002	0.6	3
22	Oct-8-2002	0.6	2
23	Oct-15-2002	0.6	1.6
24	Oct-17-2002	0.6	1.8
25	Oct-22-2002	0.8	2.2
26	Oct-24-2002	0.5	2
27	Oct-29-2002	0.6	1.6
28	Nov-5-2002	0.6	1.8

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.18.6 Demanda química de oxígeno total, DQOtot (mg/L)

DATOS	FECHA	ENTRADA	SALIDA
1	Feb-13-2002	368 2701	338 35175
2	Feb-18-2002	366 170567	153 067933
3	Feb-20-2002	377 718	113 1768
4	Feb-26-2002	318 931067	194 008833
5	Feb-27-2002	330 4785	198 2079
6	Mar-4-2002	398 18845	174 58815
7	Abr-1-2002	341 6622	110 9604
8	Abr-8-2002	461 3496	67 5954
9	Abr-10-2002	319 1124	97 0836
10	Abr-15-2002	291 3588	84 3632
11	Abr-18-2002	250 8848	81 4722
12	Abr-23-2002	253 1976	58 9224
13	Abr-30-2002	379 8234	97 0836
14	May-2-2002	419 7192	84 9414
15	May-6-2002	456 1458	161 2638
16	May-8-2002	310 4394	152 5908
17	May-13-2002	209 8326	62 3916
18	May-20-2002	223 7094	86 676
19	May-22-2002	257 8232	65 8608
20	May-30-2002	199 175633	148 2339
21	Jun-4-2002	371 682867	137 814
22	Jun-6-2002	246 644067	71 8213
23	Jun-11-2002	198 017867	85 7145
24	Jul-4-2002	290 6392	103 081
25	Jul-9-2002	238 5397	96 1344
26	Jul-16-2002	207 28	123 9208
27	Jul-18-2002	184 5621	92 241
28	Jul-23-2002	113 896567	68 3059
29	Sep-3-2002	250 9016	135 6396
30	Sep-5-2002	297 0064	181 7444
31	Sep-19-2002	189 9774	275 051733
32	Sep-24-2002	283 8336	152 1056
33	Oct-1-2002	170 2182	82 9484
34	Oct-3-2002	303 5928	169 669333
35	Oct-8-2002	270 6608	198 2104
36	Oct-15-2002	280 5404	71 4222
37	Oct-17-2002	183 391	68 129
38	Oct-22-2002	354 6374	84 595
39	Oct-29-2002	218 9612	86 146
40	Nov-5-2002	247 678	127 4264

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A. 19 MANEJO, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN

Durante el periodo experimental en esta investigación se generaron residuos de tipo químico (generados en el laboratorio) y biológicos (poda de carrizos y lodos del sedimentador primario).

A.19.1 RESIDUOS GENERADOS DURANTE LA FASE ANALÍTICA

Los residuos generados durante la fase analítica de la investigación son, principalmente, residuos de la determinación de la demanda química de oxígeno. De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, dichos residuos son considerados como peligrosos por su contenido de plata, mercurio y cromo. Los elementos antes mencionados le dan el carácter de peligrosos por su toxicidad al ambiente. La técnica marca cierta cantidad de reactivo, especificada por la Tabla A. 19.1 (Oaxaca Grande, 1997). En cada sistema se efectuaron réplicas por triplicado a la entrada y la salida. Por lo tanto, la cantidad total de residuos generada en ambos sistemas en un día fue de 72 mililitros. El manejo de dichos residuos se efectuó utilizando guantes de látex, ya que se trata de residuos que contienen líquidos ácidos concentrados. La acumulación y almacenamiento temporal de los mismos se efectuó en un frasco de vidrio de boca ancha y con tapa roscada. La técnica de neutralización de los residuos se explica en el Anexo A.20, también se especifica el material necesario para su neutralización.

Tabla A.19.1. Generación de residuos por el método estándar de reflujo cerrado en la determinación de la demanda química de oxígeno por muestra unitaria

Muestra y reactivos	Residuos generados
Muestra	2 mL
H ₂ SO ₄	3 mL
Solución de digestión	1 mL
Cantidad total de residuos	6 mL



A.19.2 RESIDUOS GENERADOS EN LOS SISTEMAS EN ESTUDIO

Los residuos generados en los sistemas principalmente son de dos tipos.

1. Lodos primarios. Generados al realizar la purga de lodos en los sedimentadores primarios del sistema.
2. Materia orgánica. Resulta de la poda de cada sistema y consiste principalmente de carrizos, aunque también hay papiros, zacatules y tules.

La disposición de cada uno de los residuos anteriores se puede efectuar por separado. Los lodos activados dependiendo de su composición y tipo pueden ser reciclados para recuperar ciertos materiales y también para poder utilizarse como fertilizantes que mejoren los suelos.

Algunas recomendaciones en el manejo y el uso de los residuos generados en el sedimentador primario (fosa séptica) pueden ser consultadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, referente a fosas sépticas prefabricadas. De dicha norma se desprende lo siguiente:

Para garantizar el adecuado funcionamiento de la fosa séptica se recomienda una inspección visual del contenido de la misma cuando menos cada seis meses. Así mismo, limpiarla antes que se acumule demasiado material flotante que pudiera obstruir las tuberías de entrada o de salida y que los lodos acumulados en el fondo de la unidad se retiren por lo menos cada doce meses, dependiendo de la cantidad que venga con el agua residual.

Para el mantenimiento adecuado de la fosa séptica se recomienda que:

1. Para hacer la inspección o la limpieza, al abrir el registro evitar respirar los gases del interior y esperar 30 minutos hasta tener la seguridad de que la fosa se ha ventilado adecuadamente, pues los gases que se acumulan en ella pueden



- causar explosiones o asfixia (metano, ácido sulfhídrico, etc.). Nunca se usen cerillos o antorchas para inspeccionarla.
2. La limpieza se efectúe por medio de un cubo provisto de un mango largo, o por medio de un camión-tanque equipado con una bomba para extracción de lodos (en este caso se debe prever que la fosa esté ubicada en un lugar tal que se permita el acceso al camión-tanque). Es conveniente no extraer todos los lodos, sino dejar una pequeña cantidad (10% aproximadamente) que servirá de inóculo para las futuras aguas residuales.
 3. No se lave ni desinfecte la fosa séptica después de haber extraído los lodos. La adición de desinfectantes u otras sustancias químicas perjudican su funcionamiento, por lo que no se recomienda su empleo.
 4. Los lodos extraídos sean rociados con cal para su manejo, transportación y ser dispuestos adecuadamente (enterrar en zanjas de unos 0.60 m de profundidad), *en terrenos preferentemente impermeables* (comentario de los autores).
 5. Las personas encargadas del mantenimiento y conservación de las fosas sépticas usen guantes, botas de hule y tapabocas.

La materia orgánica proveniente de las plantas, a su vez, puede utilizarse como forraje, artesanías, construcción, etc.

La hojarasca seca y los restos no reutilizados de las plantas pueden combinarse con los lodos primarios y la cal para la elaboración de *composta*, la cual sirve como ya se mencionó, para el mejoramiento de suelos. La dosis recomendada es de 226.79 kg de cal por tonelada de sólidos secos. Deben agregarse cerca del 4% del total del peso de los materiales celulósicos (hojarasca, etc.), en un 20% de la torta de lodos.

Si se dispone de la infraestructura necesaria, ambos residuos pueden ser llevados a disposición final considerando los diferentes procesos planteados por la literatura. Dicha disposición final elevaría los costos de mantenimiento para los sistemas y, por esta causa, lo más recomendable para zonas rurales e incluso suburbanas es la elaboración de *composta*.



A.20 TRATAMIENTO DE RESIDUOS GENERADOS POR LA TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL

REACTIVOS NECESARIOS PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO GENERADO POR LA TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Ácido clorhídrico 2N

Hidróxido de sodio 8N (grado industrial)

Sulfato ferroso amoniacal (grado industrial)

Ácido sulfúrico concentrado

MATERIAL NECESARIO PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO GENERADO POR LA TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

- Bata de algodón
- Guantes de látex
- Guantes de asbesto
- Lentes de protección
- Vaso de precipitado de plástico de 4L
- Pipeta graduada de 10 mL
- Propipeta
- Agitador de vidrio
- Vidrio de reloj
- Espátula
- Vaso de precipitado de vidrio de 1 L
- Vaso de precipitado de vidrio de 500 mL
- Vaso de precipitado de vidrio de 250 mL
- Matraz aforado de 100 mL
- Matraz aforado de 1 L
- Piseta
- Embudo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



PREPARACIÓN DE LOS REACTIVOS UTILIZADOS PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO GENERADO EN LA TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Ácido clorhídrico 2N

- 1) En un matraz aforado de 100 mL se pone agua destilada hasta arriba de la mitad
- 2) Se le agrega 16.6 mL de ácido clorhídrico concentrado, lentamente por las paredes del matraz (bajo la campana)
- 3) Se lleva hasta la marca del aforo con agua destilada

Hidróxido de sodio 8N

- 1) Se pesan 320 gramos de hidróxido de sodio grado industrial
- 2) El hidróxido de sodio se coloca en un vaso de precipitado de 1 L
- 3) Se le agrega agua hasta donde el vaso de precipitado marque 800 mL
- 4) El vaso de precipitado con el hidróxido de sodio se pone en una parrilla de agitación y es agitado por medio de un agitador electromagnético durante 10 minutos (bajo la campana)

Nota: tener cuidado debido a que la reacción es sumamente exotérmica

- 5) Se retira el vaso de precipitado de la parrilla de agitación con un guante de asbesto debido a que el vaso de precipitado esta sumamente caliente
- 6) El vaso de precipitado se deja bajo la campana durante 1 hora para que se enfrie
- 7) Con un embudo se pasa la solución de hidróxido de sodio a un matraz aforado de 1 L y se completa con agua hasta la marca de aforo

METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO PROCEDENTE DE LA TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

- 1) Utilizar bata de algodón, guantes de látex y lentes de protección
- 2) Colocar 1 L de residuo en un vaso de precipitado de plástico de 4 L
- 3) Agregar 20 mL de ácido clorhídrico 2N (bajo la campana)
- 4) Agitar durante 1 minuto por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
- 5) Centrifugar el residuo a 3500 rpm, -10°C, durante 5 minutos



- 6) La fase líquida se coloca en un vaso de precipitado de plástico de 4L
- 7) La fase sólida es colocada en un envase de plástico exclusivo para esto
- 8) A la fase líquida obtenida en el paso #6 se le agregan 20 g., de sulfato ferroso amoniacal (FAS) grado industrial y se agita durante 5 minutos por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
- 9) Agregar hidróxido de sodio 8N, hasta un pH = 9.5 (bajo la campana)

Nota 1: para poder realizar el paso anterior adecuadamente se deben hacer las siguientes actividades:

- a) Agregar 600 mL, de hidróxido de sodio 8N, lentamente (bajo la campana) debido a que la reacción es muy exotérmica
 - b) Dejar enfriar durante 45 minutos aproximadamente en la campana ó el tiempo necesario para que alcance una temperatura de 25°C
 - c) Una vez frío se lleva al potenciómetro, se mide el pH y se agrega el Hidróxido de Sodio 8N, necesario para llegar al pH = 9.5
 - d) Si por alguna razón el pH es mayor de 9.5 se debe agregar ácido sulfúrico concentrado hasta obtener el pH deseado
 - e) Durante las adiciones de hidróxido de sodio ó ácido sulfúrico se debe estar agitando constantemente mediante un agitador de vidrio
- 10) Una vez que el residuo tiene el pH deseado se centrifuga inmediatamente debido a que si se deja por mucho tiempo el residuo cristaliza. La centrifugación se lleva acabo a 3500 R.P.M., -10°C y durante 8 minutos
 - 11) El residuo líquido se coloca en un vaso de precipitado de plástico de 4L y se le agrega ácido sulfúrico concentrado hasta un pH = 7 (Se necesitan aproximadamente 3 mL.)
 - 12) Una vez neutralizado el residuo líquido puede vertirse por el drenaje sin ningún problema
 - 13) En una charola de metal se le pone un plástico grueso a la medida de ésta y se coloca el residuo sólido
 - 14) En una parrilla de calentamiento a 75°C se coloca la charola con el residuo durante 24 horas para que éste se seque
 - 15) Una vez seco el residuo se coloca en un recipiente exclusivo para ese uso y se envía para recuperación de los metales



A.21 MANUAL PARA LAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Manual general de humedales

1	CONDICIONES DE DISEÑO PARA LOS HA	127
1.1	Evaluación y selección del sitio	127
1.1.1	La topografía del terreno	127
1.1.2	Suelo	128
1.1.3	Riesgo de inundación	128
1.1.4	Uso del terreno existente	128
1.1.5	Clima	128
1.2	Determinación del nivel de pretratamiento	129
1.3	Selección de la vegetación y su manejo	129
1.4	Determinación de los parámetros de diseño	129
1.5	Medidas de control de vectores	131
2	ARREGLOS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA RESIDUAL A LA ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA	132
3	MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	136
3.1	Humedal artificial de flujo horizontal (HAFH)	136
3.1.1	Operación del sistema	138
3.1.2	Mantenimiento periódico del sistema	139
	(a) Mantenimiento de la rejilla	139
	(b) Mantenimiento de la bomba sumergible	140
	(c) Mantenimiento del sedimentador primario	141
	(d) Mantenimiento del reactor (humedal artificial de flujo horizontal)	143
	(e) Mantenimiento de la cisterna receptora de agua tratada	143
3.2	Humedal artificial de flujo vertical descendente (HAFVD)	151
3.2.1	Operación del sistema	153
3.2.2	Mantenimiento periódico del sistema	155
	(a) Mantenimiento de los sedimentadores primarios	155
	(b) Mantenimiento del reactor (humedal artificial de flujo vertical descendente)	156

TABLAS

1.1	Pasos principales en el diseño y construcción de sistemas de tratamiento natural (Metcalf y Eddy 1991)	127
1.2	Características típicas de los medios de soporte o lechos, usados en los humedales artificiales (Durán-de-Bazúa y col., 1999)	132
3.1	Relación de equipo y accesorios en el HAFH	137

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



3.2	Índice de problemas más comunes en la operación de la planta piloto tipo HAFH	145
3.3	Equipo y accesorios en el HAFV	152
3.4	Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFVD	157

FIGURAS

2.1	Distribución del agua residual al HAFH	133
2.2	Vista lateral de la distribución del agua residual al HAFH	133
2.3	Distribución del agua residual a la entrada del HAFH en un receptor abierto en forma de "V" (Cooper, 1993)	134
2.4	Vista lateral del arreglo con receptor abierto en forma de "V" para un HAFH (Cooper, 1993)	134
2.5	Arreglo para el colector de agua tratada a la salida del HAFH (Cooper, 1993)	135
2.6	Vista lateral del arreglo a la salida del HAFH (Cooper, 1993)	135
3.1	Ubicación del HAFH	136
3.2	Diagrama de flujo de proceso del HAFH	136
3.3	Representación esquemática de los equipos instalados en el HAFH	137
3.4	Fosa séptica	141
3.4a	Representación del flotador sumergible, colocado dentro del sedimentador primario	141
3.5	Ubicación del HAFVD	151
3.6	Diagrama de flujo de proceso del HAFVD	151
3.7	Representación esquemática de los equipos instalados en el HAFVD	152
3.8	Temporizador del HAFVD	154
3.9	Bomba autocebante del HAFVD	154
3.10	Acometida principal, bomba autocebante e interruptor de tijera para fase y neutro	154



1 CONDICIONES DE DISEÑO PARA LOS HA

Los pasos principales en el diseño y construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en los humedales artificiales se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Pasos principales en el diseño y construcción de sistemas de tratamiento natural (Metcalf y Eddy 1991)

Construcción de humedales y sistemas de plantas acuáticas flotantes
1. Evaluación y selección del sitio
2. Determinación del nivel de pretratamiento
3. Selección de la vegetación y su manejo
4. Determinación de los parámetros de diseño
5. Medidas de control de vectores
6. Diseño detallado de los componentes del sistema
7. Determinación de los requerimientos del seguimiento del sistema

A continuación se desglosan brevemente.

1.1 Evaluación y selección del sitio

Las características del sitio que pueden ser consideradas en el diseño del humedal incluyen la topografía, características del suelo, uso del terreno existente, riesgo de inundación y clima.

1.1.1 La topografía del terreno

Las ligeras pendientes en una topografía uniforme son preferidas ya que los humedales se diseñan con pendientes del 1% o ligeramente mayores. Aunque en ocasiones pueden ser construidos en pendientes escarpadas o en sitios disparejos, la cantidad de terraplén afecta el costo del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



1.1.2 Suelo

Los sitios con permeabilidad lenta (< 0.5 cm/h) en la superficie del suelo o capas subsuperficiales, son los más deseables para los sistemas a base de humedales, ya que el objetivo es tratar el agua residual en capas en las partes superiores del suelo o sustrato. De esta forma, las pérdidas por percolación a través de los perfiles del sustrato pueden ser minimizadas. Las permeabilidades de los suelos nativos pueden reducirse a propósito por compactación del suelo en la construcción del humedal. En sitios con suelos de permeabilidad rápida deben emplearse concavidades recubiertas con arcilla ó revestidas artificialmente para evitar la contaminación del subsuelo con el agua residual en tratamiento.

1.1.3 Riesgo de inundación

Los humedales se sitúan en lugares donde no se haya riesgos de inundación o que estén protegidos contra inundaciones. Cuando se instalen justamente en zonas donde haya este peligro deberán construirse provisiones para que el agua de lluvia fluya colateralmente al sistema para evitar su inundación.

1.1.4 Uso del terreno existente

En un espacio abierto o tierras de cultivo, son preferidos estos sitios para los humedales. La construcción del humedal puede proveer en forma más consistente de agua tratada para riego.

1.1.5 Clima

El clima es importante en la implementación del humedal ya que depende de la adaptación de las plantas "sembradas" en el humedal. Cuando haya inviernos crudos o reducciones o elevaciones de temperatura a lo largo del día es conveniente instalar cortinas de árboles que protejan al sistema de estos cambios climáticos para mantener la eficiencia depurativa del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



1.2 Determinación del nivel de pretratamiento

El nivel mínimo de pretratamiento para que los humedales operen adecuadamente y tengan una larga vida, puede ser un tratamiento primario (con lagunas facultativas con tiempos de retención cortos así como el clásico tanque de sedimentación o equivalentes, donde se depositen los sólidos suspendidos). Si la carga orgánica de material biodegradable es relativamente alta es muy importante instalar sistemas de tratamiento secundario anteriores al sistema de humedales (como los discos rotatorios o reactores anaerobios), ya que esto reduce el área superficial necesaria para el humedal.

1.3 Selección de la vegetación y su manejo

La vegetación juega un rol integral en los sistemas de tratamiento a base de humedales ya que transfieren oxígeno a través de sus raíces y rizomas al sistema y a los microorganismos que realizan el tratamiento biológico de depuración. Algunas de las características de la plantas usadas en los humedales ya fueron explicadas con más detalle en el Capítulo 2.

1.4 Determinación de los parámetros de diseño

Los humedales artificiales son considerados como reactores biológicos, con un perfil de flujo pistón, perfectamente mezclado. Su rendimiento es estimado mediante una cinética de primer orden para la remoción de DBO.

La siguiente ecuación es la representación básica de los reactores de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_1 t} \quad (1-1)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

donde: C_e = Concentración del contaminante en el efluente [mg/L]



C_0 = Concentración del contaminante en el influente [mg/L]

K_T = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura [d⁻¹]

t = TRH = Tiempo de residencia hidráulica [d]

El tiempo de residencia hidráulica puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q} \quad (1-2)$$

donde:

L = Largo de la celda del humedal [m]

W = Ancho de la celda del humedal [m]

y = Profundidad de la celda del humedal [m]

n = Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal

Q = Caudal medio a través del humedal [m³/d]

$$Q = \frac{Q_e + Q_s}{2} \quad (1-3)$$

donde:

Q_e = Caudal de entrada [m³/d]

Q_s = Caudal de salida [m³/d]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El cálculo del caudal medio es necesario solamente para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitación a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal. Para cálculos conservadores se supone que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de operación. Para determinar el área superficial del humedal, se combinan las ecuaciones 1-1 y 1-2 para tener lo siguiente:



$$d_t = L \cdot H' = \frac{Q \cdot \ln(C_r / C_{r0})}{K_T \cdot y \cdot n} \quad (1-4)$$

donde: A_s = Área superficial del humedal [m]

El valor de K_T para las ecuaciones 1-1 y 1-4 depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura que se tenga en el humedal. Para el cálculo de los coeficientes indicados en las ecuaciones 1-1 y 1-4, se han estimado los siguientes valores:

$$K_T = K_{20} \cdot (1.1)^{(T-20)} \quad \text{donde } T \text{ [}^\circ\text{C]} \\ K_{20} = 0.0057 d^{-1}$$

y donde: K_{20} es la constante K_T (constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, en d^{-1}) para 20°C .

Los valores promedio característicos usados en el diseño de humedales se muestran en la Tabla 1.2. Sin embargo se advierte que el uso de estos valores para el diseño son limitados ya que hay muchas variables que no fueron consideradas para ellos. Es recomendable que los parámetros de diseño sean hechos con base en estudios efectuados en sistemas piloto.

1.5 Medidas de control de vectores

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los humedales artificiales, particularmente aquellos que se encuentran completamente inundados, presentan condiciones ideales para la proliferación de mosquitos. El problema del control de vectores puede ser un factor crítico en la determinación de la factibilidad del uso y construcción de sistemas de tratamiento basado en humedales. A diferencia de los sistemas que se encuentran totalmente inundados, los sistemas que presentan un flujo subsuperficial evitan el problema de proliferación de mosquitos ya que los niveles de inundación son por debajo del lecho. Adicionalmente se evitan los malos olores dentro del sistema, así como la transmisión de enfermedades por contacto directo del agua residual.



Tabla 1.2. Características típicas de los medios de soporte o lechos, usados en los humedales artificiales (Durán-de-Bazúa y col., 1999)

Tipo de material	Tamaño	Porosidad	Conductividad	K_{20} d^{-1}
	efectivo D_{10} mm		hidráulica k_s , [$m^3/m^2 \cdot d$]	
Arena mediana	32	36 - 40	10000 - 50000	1.84
Arena gruesa	2	28 - 32	100 - 1000	1.35
Arena gravosa	8	30 - 35	500 - 5000	0.86

Los pasos 6 y 7 no se mencionan ya que son parte de la ingeniería de detalle (Durán-de-Bazúa y col, 1998).

2 ARREGLOS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA RESIDUAL A LA ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA

Existen varios arreglos que pueden ser implantados en el diseño de los sistemas de tratamiento de agua residual basados en humedales artificiales. Las Figuras 2.1 y 2 muestran los arreglos para la distribución del flujo de entrada al humedal artificial de flujo horizontal. Se aprecia que la descarga del agua residual al sistema es directamente a un lecho conformado de piedras o tezontle con un diámetro de partícula de 50 a 200 mm. Una ventaja es que se elimina la proliferación de mosquitos y la presencia de malos olores en el sistema. La desventaja de este arreglo es que no se aprecia el nivel de inundación del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

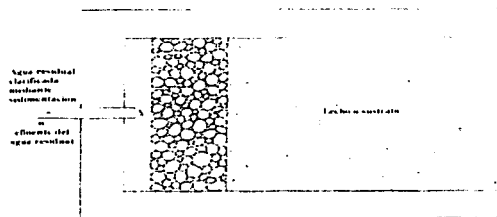


Figura 2.3. Distribución del agua residual a la entrada del HAFH en un receptor abierto en forma de "V" (Cooper, 1993)

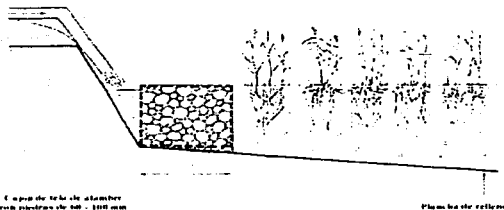


Figura 2.4. Vista lateral del arreglo con receptor abierto en forma de "V" para un HAFH (Cooper, 1993)

Así como se tienen arreglos en la distribución de agua residual a la entrada del sistema, también se cuenta con arreglos para los colectores de salida. El más común y recomendado es el que se muestra en las Figuras 2.5 y 6.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

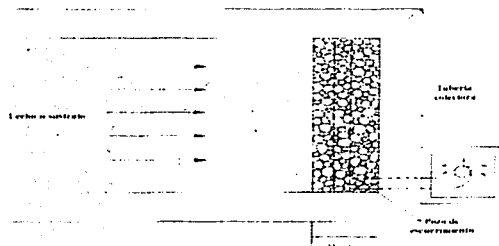


Figura 2.5. Arreglo para el colector de agua tratada a la salida del HAFH (Cooper, 1993)

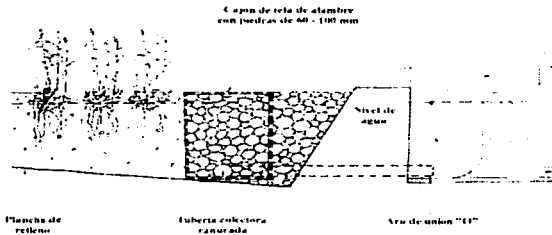


Figura 2.6. Vista lateral del arreglo a la salida del HAFH (Cooper, 1993)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



3 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

3.1 Humedal Artificial de Flujo Horizontal (HAFH)

El HAFH se encuentra ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán, un mapa de localización se muestra en la Figura 3.1.

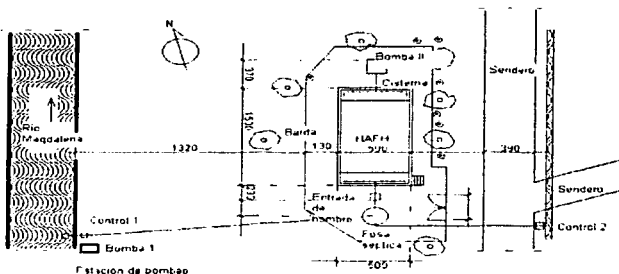


Figura 3.1. Ubicación del HAFH

Su diagrama de flujo de proceso de este sistema lo muestra la Figura 3.2. En él se aprecia una parte del equipo instalado en el HAFH.

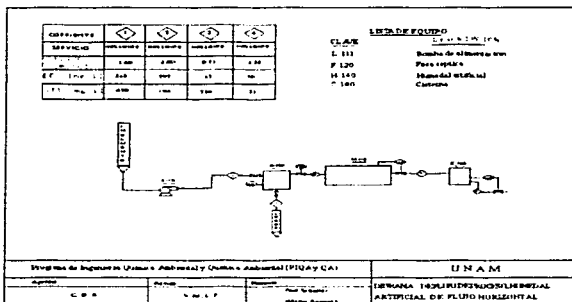


Figura 3.2. Diagrama de flujo de proceso del HAFH



Una representación esquemática de los equipos instalados en el HAFH lo muestra la Figura 3.3.

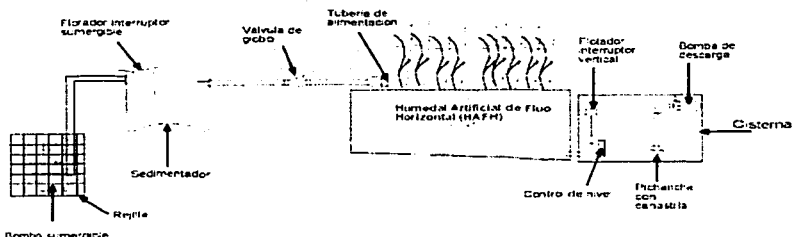


Figura 3.3. Representación esquemática de los equipos instalados en el HAFH

En la Figura 3.3 no se muestran dos interruptores de corriente eléctrica, uno instalado en el cuarto de control cercano al río denominado Control 1 (ver Figura 3.1). El segundo interruptor se encuentra instalado dentro de la cisterna.

La relación del equipo y accesorios instalados así como su función en el sistema está listada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Relación de equipo y accesorios en el HAFH

Equipo o accesorio instalado	Función en el sistema
Rejilla	Retener basura y materia flotante presente en el efluente del río
Bomba sumergible	Suministrar el agua residual hacia el sedimentador
Interruptor o acometida eléctrica principal	Interrumpir el suministro de energía eléctrica a todo el equipo electromecánico instalado en el sistema
Sedimentador primario	Separar las grasas, aceites y materia flotante, así como acumular sólidos sedimentables presentes en el agua residual
Flotador interruptor sumergible	Accionar o parar el funcionamiento de la bomba sumergible
Válvula de globo	Controlar el flujo de alimentación hacia el humedal
Tubería de alimentación	Suministrar el agua residual proveniente del sedimentador hacia el humedal
Interruptor o acometida eléctrica	Interrumpir el suministro de energía eléctrica al flotador interruptor vertical y a la bomba de descarga instalados



Flotador interruptor vertical	dentro de la cisterna
Control de nivel	Accionar o interrumpir el funcionamiento de la bomba de descarga
Pichancha con canastilla (Válvula de retención)	Permite controlar el nivel de inundación en el humedal
Bomba de descarga	La canastilla instalada alrededor de la válvula de retención permite la retención de basura presente en el agua tratada
	Descarga el agua tratada para reutilizarla

3.1.1 Operación del sistema

Basándose en el esquema presentado en la Figura 3.3 y por la relación del equipo y accesorios instalados, la operación del sistema es la siguiente:

La rejilla que cubre la bomba sumergible debe estar lo más limpia posible de basura o materia flotante.

La bomba sumergible debe estar en contacto con el efluente del río. Se debe tener cuidado de que no succione la basura o materia flotante de tamaño mayor a lo especificado por el fabricante.

Los fusibles de tipo listón dentro del interruptor o acometida eléctrica principal deben estar en buenas condiciones. Su mal funcionamiento provocaría un corto circuito eléctrico en el sistema.

No se debe permitir la acumulación de lodos dentro del sedimentador que excedan los niveles máximos de retención. Dicha acumulación provoca que los lodos sean arrastrados hacia el humedal. Los lodos acumulados dentro del sedimentador primario deben ser removidos con ayuda de una motobomba.

ADVERTENCIA: Se debe tener cuidado en el manejo de lodos ya que estos son infecto-contagiosos.

El agua residual se alimenta hacia el humedal mediante gravedad. El flujo de alimentación se controla mediante una válvula de globo (ver Figura 3.3).

La tubería de alimentación hacia el humedal debe permitir un flujo constante, por lo que debe estar libre de basura o materia flotante. No permitir que se obstruya, limpiarla con agua a presión proveniente de la cisterna.

En el humedal, el agua residual debe cubrir una parte de la superficie. Para lograr esto es necesario que el equipo electromecánico funcione adecuadamente.



No se deben permitir inundaciones que superen los 5 centímetros por encima del sustrato. Si estas inundaciones se mantienen por periodos prolongados son una fuente de proliferación de mosquitos y malos olores. Para evitarlo es necesario verificar el nivel de inundación en el humedal.

RECOMENDACIÓN: Se recomienda un nivel de inundación de 15 a 20 centímetros por debajo del lecho del humedal.

La Figura 3.3 muestra dentro de la cisterna un control de nivel. Si fuese necesario se debe mover dicho control hasta el nivel de inundación recomendado.

Un correcto funcionamiento del flotador interruptor vertical así como de la bomba de descarga y la "pichancha" (estos equipos se encuentran instalados dentro de la cisterna receptora de agua tratada), garantizan que en el humedal no se presente una inundación completa del sistema.

Mantener una vista agradable en el humedal, la cual consiste en barrer cada tres o cuatro días alrededor del humedal y eliminar las hojas secas, así como las basuras que se encuentre por acción del viento.

La limpieza de la cisterna se debe efectuar por lo menos dos veces al año.

RECOMENDACIÓN: En la limpieza del sistema no es necesario emplear ningún tipo de sustancia química ya que perjudicaría el comportamiento depurativo del sistema

Si el sistema no funciona adecuadamente y se pretende pararlo por un tiempo prolongado procurar que el humedal contenga agua residual suficiente.

RECOMENDACIÓN: Inundar el sistema hasta 5 centímetros por debajo del lecho del humedal

Modificar el control de nivel hasta lograr dicha altura y desconectar la corriente eléctrica en todo el sistema.

3.1.2 Mantenimiento periódico del sistema

Una de las actividades importantes a realizar en el humedal artificial es su mantenimiento periódico, tanto del equipo instalado como del sistema.

(a) Mantenimiento de la rejilla

Como ya se mencionó, existe una rejilla que protege a la bomba sumergible. El mantenimiento de la rejilla únicamente consiste en limpiar la basura que le rodea. Existen dos maneras de hacer dicha limpieza:

Método directo. Es necesario contar con el siguiente material para la limpieza de la rejilla:



1. Pantalón de hule con botas selladas térmicamente
2. "Goggles"
3. Guantes de hule
4. Mascarilla contra gases
5. Escoba en forma de cepillo
6. Solución de hipoclorito de sodio al 5%
7. Reata de aproximadamente 10 metros

En este método se requiere que la persona descienda al río con los aditamentos mencionados y limpie directamente la rejilla con la escoba en forma de cepillo, la solución de hipoclorito únicamente se emplea para que la persona que realiza la tarea pueda lavarse y desinfectarse.

RECOMENDACIÓN: Es indispensable por seguridad que, por lo menos, dos personas realicen este mantenimiento

Ventajas

Permite una limpieza más profunda y se elimina la basura eliminando el riesgo de que la bomba sumergida la succione.

Desventajas

El contacto con el agua residual es directo e implica un riesgo potencial de infección.

Método indirecto. Solamente es necesario contar con una extensión de una escoba en forma de cepillo la cual debe tener una altura de aproximadamente 5 metros. Cepillar la rejilla hasta eliminar la basura presente

Ventajas

Permite la limpieza de la rejilla sin descender al río contaminado con aguas residuales

Desventajas

La limpieza de la rejilla no es tan profunda y se corre el riesgo de que la bomba sumergida succione una parte importante de la basura que pase por la malla.

(b) Mantenimiento de la bomba sumergible

El mantenimiento de la bomba sumergible sólo consiste en mantener limpia la rejilla que la protege. Solamente si la bomba sumergible se descomponen es necesario descender al río para desmontarla. El equipo necesario para desmontar la bomba sumergible es el siguiente:

1. Pantalón de hule con botas selladas térmicamente
2. "Goggles"



3. Guantes de hule
4. Mascarilla contra gases
5. Escoba en forma de cepillo
6. Solución de hipoclorito de sodio al 5%
7. Reata de aproximadamente 10 metros

Como se explicó en el método directo de limpieza de la rejilla, el descender al río contaminado con aguas residuales implica un riesgo potencial de contraer alguna infección.

RECOMENDACIÓN: Tener cuidado en el uso de la herramienta y evitar que el pantalón de hule así como los guantes se rasguen con alguna saliente u otro material

(c) Mantenimiento del sedimentador primario

Dentro del sedimentador primario existe un flotador sumergible el cual es representado en la Figura 3.4. Dicho flotador interrumpe el funcionamiento de la bomba sumergible. El mantenimiento de este dispositivo, solo consiste en verificar el correcto funcionamiento del mismo. Se comprueba su funcionamiento solo inclinando un poco el flotador y verificar que la bomba sumergible descargue agua residual al sedimentador.



Fig. 3.4. Fosa séptica

Para efectuar dicha verificación se necesita del siguiente material:

1. Un par de guantes de hule
2. Una mascarilla contra gases
3. Pantalón de hule con botas selladas térmicamente
4. Goggles
5. Solución de Hipoclorito de sodio al 5%

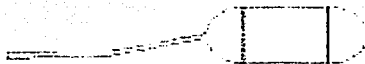


Figura 3.4a. Representación del flotador sumergible, colocado dentro del sedimentador primario

Es necesario abrir el registro donde se encuentra el sedimentador y que permanezca abierto por lo menos 5 minutos, antes de entrar en dicho registro.

RECOMENDACIÓN: No usar encendedores o algún material que provoque chispas. Esta recomendación es importante para prevenir incidentes por la cantidad de gases acumulados dentro del registro (metano, ácido sulfhídrico, etc.)



El mantenimiento del tanque sedimentador debe estar en función de la calidad de agua residual, ya que si se tiene un agua residual que contenga muchos sólidos suspendidos y sedimentables los periodos de mantenimiento deben ser muy cercanos entre sí, de tres a seis meses. En caso de que el agua residual contenga pocos o casi nada de sólidos suspendidos, los periodos de mantenimiento se realizan anualmente.

El material y las herramientas necesarios para el mantenimiento del tanque sedimentador es el siguiente:

Material

1. Pantalón de hule con botas selladas térmicamente
2. "Goggles"
3. Guantes de hule
4. Mascarilla contra gases
5. Escoba en forma de cepillo
6. Agua tratada (preferentemente la que se recolecta en la cisterna del sistema)
7. Solución de hipoclorito de sodio al 5%

Herramientas

8. Motobomba
9. Pala adaptada para la recolección de lodos

La purga de lodos se efectúa con la motobomba y con la pala adaptada para tal motivo. Es necesario llevar puesto el pantalón de hule, los "goggles", guantes de hule y la mascarilla contra gases. La escoba en forma de cepillo y el agua tratada sólo se utilizan para limpiar el sedimentador. La solución de hipoclorito de sodio solamente se utiliza para desinfectar las áreas del cuerpo que estuvieron en contacto directo con el agua residual y los lodos generados en el sedimentador primario.

Los lodos generados en el sedimentador pueden ser empleados en la elaboración de composta, siempre y cuando se adapte un sitio para tal efecto. Es necesario que los lodos sean tratados con cal, para que la elevación del pH inactive los organismos potencialmente patógenos que se encuentren en dichos lodos.

RECOMENDACIÓN: Es necesario colocar en el tanque sedimentador una válvula de purga de lodos (al fondo) para, de esta forma, conectar una motobomba y así eliminar los lodos procedentes del sedimentador con mayor facilidad, evitando con esto el contacto directo de lodos con el personal de mantenimiento. Se recomienda dejar dentro del sedimentador un 10% de lodos como inóculo para la degradación que ocurre.

ADVERTENCIA: Los lodos generados dentro del sedimentador son altamente infecciosos y contagiosos de enfermedades como el cólera, la salmonelosis, la fiebre tifoidea y otros tipos de enfermedades

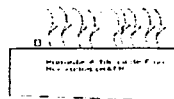


(d) Mantenimiento del reactor (humedal artificial de flujo horizontal)

Este componente es la pieza fundamental de todo el sistema ya que es en este reactor es donde se efectúa la depuración del agua residual.

Su mantenimiento es el siguiente:

Tuberías y accesorios



Verificar que la válvula de globo así como la tubería de alimentación no se obstruyan. Si se presenta una obstrucción en la tubería de alimentación del HAFH, se recomienda una limpieza con un alambre el cual sirva de guía y un aditamento para arrastrar el material que obstruye la tubería, lavar la tubería con agua tratada inyectándola, esto se logra usando la potencia de la bomba de descarga localizada dentro de la cisterna. Efectuar esta acción anualmente.

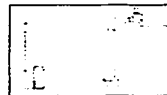
Humedal

Dado que en el humedal existen plantas, se debe retirar en lo posible la materia seca que se encuentre dentro del humedal para evitar que su descomposición aumente la "carga orgánica". También deben podarse las plantas (carrizos) dos veces al año. La primera poda se efectúa al terminar la temporada de clima frío (enero-febrero) y la segunda poda se realiza cuando los carrizos tienen una altura mayor a los 2 metros, generalmente después de las lluvias (al terminar el verano, septiembre). Es recomendable que cuando los carrizos tengan al menos 2 metros de altura se poden hasta una altura no mayor de 1 metro. Debe evitarse que caiga tierra dentro del humedal, durante la temporada de lluvias (por arrastre), ya que esto provoca la obstrucción del material de soporte. Un factor que debe controlarse es el nivel de inundación y, por esto, debe mantenerse en un intervalo de 15 a 20 centímetros por debajo del sustrato o material de soporte.

(e) Mantenimiento de la cisterna receptora de agua tratada

Si el agua tratada procedente del humedal se reutiliza para riego, es recomendable tener una cisterna de recepción de agua tratada, en la cual se almacenará el agua tratada por un periodo de tiempo corto. Su mantenimiento es sencillo ya que lo único que tiene que realizarse es la evacuación total de agua tratada, llevando a cabo un ligero lavado con la misma agua tratada procedente del humedal. No debe utilizarse ninguna clase de detergente en el lavado de la cisterna. El mantenimiento está previsto para un periodo de seis meses a un año. El mantenimiento en los equipos electromecánicos instalados dentro del sistema solamente consiste en la verificación de su correcto funcionamiento. Los equipos electromecánicos instalados dentro de la cisterna son:

1. Interruptor o acometida eléctrica
2. El flotador interruptor vertical





3. Bomba de descarga
 - a) Válvula de retención
 - b) Canastilla

La canastilla instalada en la válvula de retención solamente sirve como filtro de hojas secas, por lo que su mantenimiento consiste en limpiarla con un cepillo y agua residual tratada.

Si dichos equipos presentan fallas es necesario desmontarlos y cambiarlos por uno nuevo o, en su defecto, arreglarlos.

Un aditamento instalado también dentro de la cisterna es:

4. Controlador de nivel

Este controlador únicamente sirve para mantener un nivel de inundación dentro del humedal y casi no requiere de mantenimiento. Solamente hay que verificar que mantenga una posición adecuada.

Es importante tomar en cuenta que este sistema es biológico y, por esta causa, su efecto depurativo se ve afectado por las condiciones climáticas.

Al igual que el mantenimiento, también es necesario conocer los problemas típicos presentes en el funcionamiento del sistema. La Tabla 3.2, es un listado o índice de problemas típicos que pueden presentarse en el HAFH. El listado presenta el problema, así como una serie de posibles causas, los equipos o puntos a verificar y, por último, la acción correctiva para aminorar el impacto dentro del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.2. Índice de problemas más comunes en la operación de la planta piloto tipo HAFH

PROBLEMA	CAUSA POSIBLE	VERIFICAR	ACCIÓN CORRECTIVA
No hay flujo de alimentación	<ol style="list-style-type: none"> 1 Válvula cerrada 2 Sedimentador vacío 3 Mal funcionamiento de la bomba sumergible y/o el flotador 4 Obstrucción de la red 5 Obstrucción de la tubería de alimentación 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Que la válvula de descarga al humedal se encuentre abierta en una posición ya establecida 2 Si el sedimentador se encuentra vacío. Corroborar que exista fluido eléctrico y, si no hay, revisar que los fusibles estén en buen estado. Si hecho esto aún no hay energía eléctrica, corroborar cargas. 3 El funcionamiento de la bomba sumergible y el flotador 4 Dentro del sedimentador, en la tubería de descarga existe una red o malla que obstruye el paso de basura succionada por la bomba sumergible, observar que dicha red no se encuentre obstruida. 5 Si se verificaron los puntos anteriores y son satisfactorios, entonces, la tubería se encuentra obstruida. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abrir la válvula en una posición preestablecida. 2 Conectar la energía eléctrica, si es que no la había 3 Si no funciona la bomba sumergible, desmontarla y mandarla a reparar, previa desconexión de todo tipo de alimentación eléctrica. Si el flotador tiene mal funcionamiento cambiarlo en forma inmediata. 4 Desmontar la red, lavarla y volver a montarla 5 Limpiar la tubería con un alambre guía y con un trapo de arrastre e inyectarle agua tratada.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Se percibe mal olor en el humedal	<ol style="list-style-type: none"> 1 Inundación del sistema por un periodo prolongado 2 Mala posición de la manguera de descarga hacia la cisterna 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Inspeccionar y corroborar que el equipo de bombeo de descarga funcione correctamente 2 Verificar la posición de la manguera de descarga 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Si el equipo de bombeo funciona y las condiciones lo permiten desalojar toda el agua tratada de dentro de la cisterna para con esta forma ir disminuyendo el nivel de inundación dentro del humedal. 2 Colocar la manguera de descarga hacia la cisterna en una posición con la cual se tenga un nivel de inundación dentro del humedal de aproximadamente 15 a 20 centímetros antes del nivel máximo de inundación.
Se percibe mal olor en el agua tratada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mala posición de la manguera de descarga hacia la cisterna 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si la manguera de descarga no se encuentra muy por debajo de 15 a 20 centímetros antes del nivel máximo de inundación 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Colocar la manguera de descarga hacia la cisterna en una posición con la cual se tenga un nivel de inundación dentro del humedal de aproximadamente 15 a 20 centímetros antes del nivel máximo de inundación
Plantas amarillas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mala posición de la manguera de descarga hacia la cisterna 2. Agua contaminada con algún agente tóxico para las plantas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El nivel de inundación dentro del humedal. 2. Propiedades físico-químicas del agua residual. 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Colocar la manguera de descarga hacia la cisterna en una posición con la cual se tenga un nivel de inundación dentro del humedal de

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

aproximadamente 15 a 20 centímetros antes del nivel máximo de inundación.

2. Interrumpir el suministro de agua residual hacia el humedal.

Inundación completa del humedal. la altura del agua residual sobrepasa los 20 centímetros del nivel máximo

1. Mal funcionamiento del equipo de bombeo en la cisterna.
2. Mal funcionamiento del flotador interruptor ubicado en el sedimentador.

1. Que el equipo de bombeo no se encuentre totalmente sumergido en agua tratada

2. Que si el registro donde se encuentra el sedimentador no esté inundado. completamente o semi inundado.

Para ambos casos mencionados en los puntos a verificar anteriores, la acción correctiva que se debe tomar por orden es:

- a) Interrumpir la energía eléctrica de la acometida principal.
- b) Desalojar el agua residual con ayuda de una moto bomba, hasta un nivel mínimo dentro del humedal.

Para cada uno de los puntos.

1. Con ayuda de una motobomba desalojar el agua tratada de dentro de la cisterna, esto si el equipo de bombeo está totalmente sumergido. Esta acción se mantiene hasta tener la posibilidad de realizar maniobras de desmontar el equipo de bombeo (flotador y bomba de descarga), reparar el equipo y volver a montarlo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Inundación del humedal 5
centímetros por arriba del
nivel máximo

1. No existe corriente eléctrica en la caja de distribución, dentro de la cisterna.
2. Mal funcionamiento del flotador vertical
3. No funciona la bomba de descarga.
4. La válvula de retención o "PICHANCHA", no es capaz de retener agua.
1. Que exista suministro de energía eléctrica hacia la cisterna y también verificar que los fusibles funcionen correctamente.
2. Observar que el flotador vertical interrumpa y accione correctamente.
3. El funcionamiento de la bomba de descarga
4. Nivel de "purga" de la bomba.

2. Cuando se encuentre inundado o semi inundado el registro, su acción correctiva es la de abrir una válvula que se encuentra cercana al canal de riego y esperar a que se vacíe el registro. Con una moto-bomba evacuar el agua residual del interior de la fosa o sedimentador primario, purgar lodos y cambiar el flotador interruptor si es que no funciona bien. También hay que limpiar la red que se encuentra dentro del sedimentador

1. Si existe suministro de energía eléctrica hacia la cisterna, cambiar fusibles si estos están mal.
2. Desconectar la energía eléctrica hacia la cisterna. Desmontar y arreglar el mal funcionamiento del flotador. Si el problema continua se recomienda cambiar el flotador por uno nuevo y montarlo nuevamente. Restablecer la energía eléctrica en la cisterna

Aditamento que sirve 3
como filtro al final de la
"PICHANCHA"

En caso de que exista energía eléctrica y que el flotador funcione correctamente, desconecte el suministro de energía eléctrica de la toma principal. Si es posible la maniobra libre para desmontar la bomba, realice el desmontaje de la bomba. Si no fuese posible la maniobra libre, con ayuda de una moto-bomba o bomba portátil, evacuar el agua tratada del interior de la cisterna, y "ahorcar" la manguera de descarga, enganchando eslabones de la cadena que la sostiene y proceda a desmontar la bomba. Si existiera una bomba de repuesto móntela. De lo contrario, esperar a que se arregle la bomba y montarla nuevamente. Purgue la bomba, conecte la energía eléctrica y realice pruebas de paro y acción con el flotador.

4. Si al conectar la bomba, no se aprecia descarga alguna, desconecte la energía

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



FALTA DE ORIGEN

CON

eléctrica a la bomba, purgue la bomba y conecte la energía eléctrica e inicie la descarga de agua tratada. Si después de apagada la bomba se acciona nuevamente y no presenta descarga de agua tratada, desconecte la energía eléctrica, desmonte la "PICHANCHA" y observe que el aditamento no se encuentre roto en la malla que lo recubre, en caso afirmativo, colocar una nueva malla a la canastilla, elimine las hojas en la válvula de retención y vuelva a montar la "PICHANCHA". En caso de que no esté rota la malla, desmonte el aditamento y la válvula, reemplace la "PICHANCHA" por una nueva.



Una representación esquemática de los equipos instalados en el HAFVD se muestra la Figura 3.7.



Figura 3.7. Representación esquemática de los equipos instalados en el HAFVD

En la Tabla 3.3 se describe el funcionamiento en el sistema de las partes del sistema de flujo vertical descendente.

Tabla 3.3. Equipo y accesorios en el HAFV

Equipo o accesorio instalado	Función en el sistema
Sedimentador primario 1	Separar las grasas, aceites y materia flotante, así como acumular sólidos sedimentables presentes en el agua residual
Registro	Examinar posibles taponamientos en las tuberías y unir la corriente proveniente del sedimentador primario 1, con la corriente de las regaderas
Sedimentador primario 2 o tanque homogenizador	Separar las grasas, aceites y materia flotante, así como acumular sólidos sedimentables presentes en el agua residual, además de homogenizar el agua residual antes de ser enviada al humedal
Interruptor o acometida eléctrica principal	Interrumpir el suministro de energía eléctrica a todo el equipo electromecánico instalado en el sistema
Interruptor de tijera para fase y neutro	Interrumpir el suministro de energía eléctrica al equipo electromecánico instalado en el sistema, y reiniciar el temporizador
Transformador, 115VAC – 24 VCC	Disminuir el voltaje y transformar la corriente alterna en directa



Relé activado por bobina, 24V	Relevar la corriente
Temporizador ("timer") para arranque y paro, 24V	Establece el tiempo de bombeo
Relé activado por flotador	Quita la corriente cuando el nivel del sedimentador primario 2, se encuentra bajo
Electrobomba autocebante	Suministra el agua residual al humedal
Válvula de globo 1	Evita que se derrame el agua residual del sedimentador primario 2, al gabinete de protección de la electrobomba, cuando se tenga que hacer alguna compostura
Válvula de globo 2	Evita que se derrame el agua residual acumulada en la tubería que va al humedal, en el gabinete de protección de la electrobomba, cuando se tenga que hacer alguna compostura
Válvula de paso	Sirve para hacer la purga de lodos en el sedimentador primario 2
Tubería de irrigación	Suministrar el agua residual proveniente del sedimentador primario 2 hacia el humedal, de tal forma que se haga una irrigación uniforme sobre la superficie del lecho en el humedal
Manguera de descarga del humedal	Permite controlar el nivel de inundación en el lecho del humedal

3.2.1 Operación del sistema

Tomando como base la Figura 3.7 se describe la operación del sistema.

El sedimentador primario 1 deberá retener la mayor cantidad de sólidos presentes en el agua residual.

En el sedimentador primario 2 o tanque homogenizador se retienen los sólidos que lleguen a pasar del sedimentador 1, además de que el agua se homogeneiza.

Dentro del gabinete de protección a la bomba, se encuentran el interruptor o acometida eléctrica principal, el temporizador ("timer" para arranque y paro), un interruptor de tijera para fase y neutro, un transformador de 115VAC - 24 VCC, un relé activado por bobina 24V, el relé activado por flotador, una electro-bomba autocebante, dos válvulas de globo. En la operación de estos equipos se debe verificar la existencia de energía eléctrica, las condiciones y tiempos en que permanezcan trabajando serán los preestablecidos por el operador o encargado del sistema, con el fin de identificar el flujo óptimo.



En la Figura 3.8 se puede apreciar el temporizador, que es en donde el operador programa el tiempo de bombeo, así como los intervalos de paro y arranque. En la Figura 3.9 se muestra la bomba autocebante conectada al temporizador.

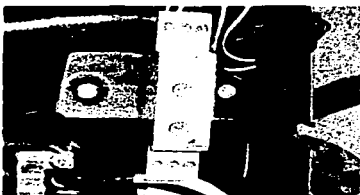


Figura 3.8. Temporizador del HAFVD

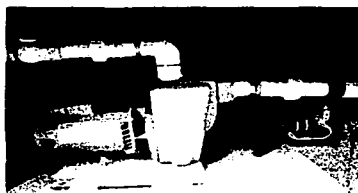


Figura 3.9. Bomba autocebante del HAFVD

En la Figura 3.10 se muestra la acometida principal, el Interruptor de tijera para fase y neutro, además de la bomba.



Figura 3.10. Acometida principal, bomba autocebante e interruptor de tijera para fase y neutro

El interruptor o acometida eléctrica principal permite quitar la corriente eléctrica en caso de deban realizarse composturas o trabajos de mantenimiento. En el temporizador se programan los períodos de bombeo y sus tiempos hacia el humedal. El interruptor de tijera para fase y neutro sirve para reiniciar la programación del temporizador. En el caso del transformador y los relevadores se deben verificar las cargas con un multímetro. De presentarse algún mal funcionamiento se deberán reemplazar. Se requiere de un controlador de nivel dentro del sedimentador primario 2 para evitar que un relevador desconecte la corriente de la electro-bomba autocebante.



La tubería de irrigación se debe revisar periódicamente para verificar que no exista algún desprendimiento y/o taponamientos, dentro del humedal. Debe evitarse la acumulación de basura y materia seca, así como revisarse el nivel de inundación.

RECOMENDACIÓN: El nivel de inundación para los sistemas de flujo vertical es mínimo (100 cm abajo del nivel del "piso" es el área húmeda) considerando que la altura es de 130 cm.

3.2.2 Mantenimiento periódico del sistema

Muchas de estas tareas son similares a las descritas para el sistema de flujo horizontal, por lo que se dará énfasis solamente a aquellos aspectos que son diferentes a los del sistema de flujo horizontal.

(a) Mantenimiento de los sedimentadores primarios

El sedimentador primario 1 debe desazolarse por lo menos una vez al año, aunque es recomendable hacerlo al menos cada 6 meses (por la experiencia acumulada en este lapso).

El sedimentador primario 2 o tanque homogenizador, depende principalmente de las condiciones en las que opera el sedimentador primario 1; por lo que también debe tener un desazolve de, por lo menos, una vez al año. Además, debe realizarse una purga de lodos dos veces al año. Estas purgas dependen de las características del influente al humedal. El material y las herramientas necesarios para el mantenimiento del tanque homogenizador es el siguiente:

Material

1. Pantalón de hule con botas selladas térmicamente
2. "Goggles"
3. Guantes de hule
4. Mascarilla contra gases
5. Solución de hipoclorito de sodio al 5%
6. Pala adaptada para la recolección de lodos
7. Varilla de $\frac{1}{2}$ cm de diámetro y 50 cm de longitud
8. Bidones (Los que se requieran)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El desazolve de ambos sedimentadores se efectúa mediante un camión cisterna, conocido como "Vector", ya que succiona con una bomba al vacío, el cual se solicita por medio de memorándum a la Dirección General de Obras y Servicios Generales de la UNAM. La purga de lodos se efectúa por medio de una válvula de paso (esta operación se realiza manualmente).

ADVERTENCIA: Se debe tener cuidado en el manejo de lodos ya que estos son infecto-contagiosos



El equipo que se encuentra instalado en el cuarto de protección a la bomba se debe revisar cada cuatro meses con el fin de verificar su funcionamiento. El material y equipo que se requiere es el siguiente:

1. Escoba en forma de cepillo
2. Guantes de electricista o de carnaza
3. Pinzas de punta
4. Pinzas de electricista
5. Cinta plástica
6. Navaja
7. Desarmadores planos y de cruz
8. Fusibles de listón
9. Multímetro

El mantenimiento periódico consiste primero en la verificación de la corriente eléctrica en los equipos. Después de bajar el interruptor de la acometida principal, se prosigue quitando escombros y polvo de los equipos, se verifican los fusibles que se encuentran en la acometida principal y, por último, se hacen pruebas tomando el tiempo de bombeo al humedal, con el fin de corroborar que siga manteniendo el tiempo establecido.

Para el mantenimiento del humedal se requiere de lo siguiente:

1. Guantes de hule
2. Guantes de carnaza
3. Tijeras para podar
4. Rastrillo
5. Pala
6. Machete
7. Manguera (solicitada en los Talleres de Conservación de la UNAM)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

(b) Mantenimiento del reactor (humedal artificial de flujo vertical)

El mantenimiento del humedal consiste primero en la revisión de la tubería de irrigación. Ésta debe estar bien ensamblada y los orificios de irrigación no deberán estar obstruidos. En caso contrario, la tubería se ensamblará adecuadamente. La limpieza de los tubos de irrigación se lleva a cabo uno por uno, desmontándolos y limpiando con agua a presión, tomada de la toma para riego de las pilas de *composta*. Se verificará el nivel de inundación, el cual debe ser mínimo (depende de la longitud de las raíces de las plantas. La materia seca o basura que se encuentre en el humedal debe retirarse, por lo menos cada mes y, por lo menos una vez al año, se realiza la poda parcial de los alrededores del humedal así como de las plantas que degradan el agua residual.

Al igual que con el sistema de flujo horizontal, también es necesario conocer los problemas típicos presentes en el funcionamiento del sistema. La Tabla 3.4, es un listado o índice de problemas típicos que pueden presentarse en el HAFVD. El listado presenta el problema, así como una serie de posibles causas, los equipos o puntos a verificar y, por último, la acción correctiva para aminorar el impacto dentro del sistema.



Tabla 3.4. Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFVD

Situación observada	Problema real	Acción correctiva	Resultado	Sugerencias
El nivel de agua dentro del humedal rebasa el nivel del lecho ocasionando una inundación	El humedal esta trabajando en condiciones que no son adecuadas para este sistema en específico	Bajar la manguera de descarga en la cisterna hasta llegar a una altura adecuada	Las plantas empiezan a reverdecer y el sistema empieza a trabajar adecuadamente	Se recomienda verificar el nivel de inundación dentro del humedal continuamente
Se observa que los sedimentadores están sobresaturados de material sobrenadante	Ambos sedimentadores no han tenido mantenimiento en un largo tiempo	Se solicita apoyo para el desazolve de ambos sedimentadores a las autoridades de la UNAM	Se reduce la carga en DCO en las muestras de entrada al humedal	Se recomienda realizar un desazolve regularmente cada seis meses
Las plantas tienen color amarillento y algunas están secándose	El clima es muy seco durante la etapa de invierno y algunas partes de la tubería de irrigación esta tapada con lodos	Elevar el nivel de inundación del humedal y limpiar la tubería	Las plantas recuperan su color verde y siguen creciendo además de empezar a reproducirse	Se recomienda revisar la tubería de irrigación continuamente (una vez por semana)
El porcentaje de DCO aumenta y el sedimentador secundario se satura de lodos y matena sobrenadante	Una de las tuberías pasa directamente al sedimentador lo que ocasiona un incremento de lodos	Realizar una adaptación a esta tubería para evitar la entrada de aguas sin un tratamiento previo	Disminución de la carga orgánica y obtención de un tiempo mas largo para realizar los desazolves	Debido a que hay dos edificios los cuales generan aguas residuales se recomienda hacer un sedimentador más grande
Mala distribución en el flujo de alimentación al humedal	La tubería de irrigación esta obstruida o se desmonto alguna parte	Limpiar y ensamblar bien la tubería de irrigación	Mejor distribución del flujo a la entrada e incremento en la depuración	Revisar la tubería de irrigación cada 15 días

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A.22 TABLAS QUE PRESENTAN LOS REQUERIMIENTOS DE LAS NOM-001-SEMARNAT-1997 Y NOM-003-SEMARNAT-1997

En la Tabla A.22.1 se muestran los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales obtenidos de la Norma NOM-001-SEMARNAT-1997.

Tabla A.22.1. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (NOM-001-SEMARNAT-1997)

PARAMETROS	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																																							
	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS NATURALES										AGUAS COSTERAS					SUELO																								
	Y ARTIFICIALES																																							
(Empalmados por 100, disminuido cuando se aplican los factores)	Uso en riego agrícola (A)				Uso público urbano (B)				Protección de zona agrícola (C)				Uso en riego agrícola (D)				Uso público urbano (E)				Explotación por actividades hidroagrícolas y otros usos (F)				Recreación (G)				ESTUARIOS (H)				Uso en riego agrícola (I)				HUMEDALES NATURALES (J)			
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.										
Temperatura (°C)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.										
Índice de oxígeno (I ₅)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25								
Índice de oxígeno (I ₅)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.									
Sólidos suspendidos totales	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2								
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125								
Densidad aparente de O ₂ en agua	130	200	75	150	30	50	75	150	30	50	75	150	30	50	75	150	30	50	75	150	30	50	75	150	30	50	75	150	30	50	75	150								
Intensidad Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.									
Índice Total	20	30	20	30	9	10	20	30	9	10	20	30	9	10	20	30	9	10	20	30	9	10	20	30	9	10	20	30	9	10	20	30								

P. U. = Promedio Diario; P. M. = Promedio Mensual; N. A. = No se aplica; (A), (B) y (C): Tipo de Campo Protector según la Ley Federal de Derechos.

En la Tabla A.22.2 se muestran los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas obtenidos de la Norma NOM-003-SEMARNAT-1997.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Tabla A.22.2. Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997)

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES

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

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WPCF. 1989. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Díaz de Santos, editores. México D.F. México.
- Batchelor, A., Loots, P. 1996. A critical evaluation of a pilot scale subsurface flow wetland: 10 years after commissioning. En Memories of 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Pp. XI/4-1 a XI/4-9. Viena, Austria.
- Beerens, H. 1998. Bifidobacteria as indicators of fecal contamination in meta and meta products. Detection, determination of origin, and comparison with Escherichia coli. Intl. J. Food Microbiol., 40:203-207.
- Brix, H. 1987. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants – the root zone method. Wat. Sci. Technol., 19(1):107-118.
- Brix, H. 1993 Water Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. En Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Ed. G. A. Moshiri, Ph.D Editorial Lewis Publishers. Pp. 9-19. Boca Raton, FL. EEUUA.
- Brix, H. 1994a. Use of constructed wetlands in water pollution control: historic development, present status, and future perspectives. En Reprint of paper presented the IAWQ Biental Conference. Pp. 344-389. Budapest, Hungría.
- Brix, H. 1994b. Subsurface horizontal flow systems-systems components. En CICHEAM-IAWQ Course: Role of wetlands for the control of pollution. Pp. 1-14. Madrid, España.



- Castro-González, A., Durán-de-Bazúa, C. 2002. **Procesos de separación: Aplicaciones para la cuantificación de biogases producidos en reactores anaerobios.** Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ, México), 17(2):84-94.
- Cooper, P.F. 1993. **The Use of Reed Bed Systems to Treat Domestic Sewage: The European Design And Operations Guidelines for Reed Bed Treatment Systems.** En Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Ed. G. A. Moshiri, Ph.D. Editorial Lewis Publishers. Pp. 203-217. Boca Raton, FL. EEUUA.
- Coss, W. 2000. **Agro Tierra.** Editorial. Revista Teorema. Año 8. Número 35. Agosto-Septiembre. Editores AGRO-TEOREMA. México D.F. México.
- Durán-de-Bazúa, C. 1994. **Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso.** Pub. PIQAyQA-FQ-UNAM. 5ª. Ed. Pp. 4-44. México, D. F. México.
- Durán-de-Bazúa, C., Haberl, R., Kreiner, I., Ranjani-Krishnan, Luna-Pabello, V. M. (Profesores); Fenoglio-Limón, F.E.; Kneidinger, Ch.; Millán-Hernández, S.E.; Miranda-Ríos, M.; Ramírez-Carrillo, H.F.; Salinas-Castillo, N.V.; Sánchez-García, H.; Schaller, P.; Soto-Esquivel, M.G. (Estudiantes). 1999. **Humedales artificiales en México: Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales. SERIE: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA.** Vol. 6. PUB. PROG. ING. QUIM. AMB. Y QUIM. AMB. FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM. ISBN 968-36-9443-8. 185 pags. 1a. Ed. (1999), México D.F. México. 2a. Ed. (En prensa).
- Durán-de-Bazúa, M.C., Luna-Pabello, V. M., Ramírez-Carrillo, H.F. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. **Patente Núm. 9810668.** Otorgada en septiembre de 2002. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, Dirección Divisonal de Patentes. México.



Durán-de-Bazúa, C. (Global Resp.), Salinas-Castillo, N.V., Ramírez-Burgos, L.I., Ortega, A., Esponda-Aguilar, P.L., Fenoglio-Limón, F.E., Rodríguez-Monroy, J., Varela-Montellano, E., Rodríguez-Cruz, A., Juárez-Méndez, C.H. 2002. Pathogen organisms reduction in treated wastewaters in artificial horizontal and vertical flow wetland systems. Presentado en **ISEB 6 Sixth International Symposium on Environmental Biotechnology and Fourth International Symposium on Cleaner Bioprocesses and Sustainable Development**, Dept. Environmental Biotechnology, Institute of Ecology. Junio 9-12, Veracruz, Ver., México.

Esponda-Aguilar, P.L. 2001a. **Programa de Servicio Social: Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQAYQA)**, tercera etapa. Construcción, arranque y operación de un humedal de flujo vertical. **Clave asignada: 2000-12/16-3992. Responsable del programa: Dra. en Ing. Carmen Durán Domínguez de Bazúa. Cargo: Coordinadora Global. Período: Septiembre 2000-Junio 2001.** México D.F., México.

Esponda-Aguilar, P.L. 2001b. **Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales** Tesis profesional, Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM, México D.F. México.

Fenoglio-Limón, F. E. 2000. **Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical.** Tesis profesional. Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM, México D.F. México.

Fenoglio-Limón, F. E. 2003. **Fenómenos de transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas.** Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Orientación: Química Ambiental). UNAM. Junio 5. México D.F. México.



- Green, M. B. Griffin, P., Seabridge, J. K., Dhoibie, D. 1997. Removal of bacteria in subsurface flow wetlands. Wat. Sci. Technol., 35(5):109-116.
- Guerrero, G. 2002. Sensibilidad antimicrobiana de Samonella y Shigella a la fosfomicina y su espectro de comparación contra sulfametoxazol y cloranfenicol. Tesis profesional. Escuela de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México.
- Guzmán-Aguirre, S. 2003. Evaluación del sistema de humedales artificiales en la eliminación de microorganismos patógenos en aguas residuales. Documento final de investigación. Laboratorio de Desarrollo Experimental de Alimentos, Labdea. Facultad de Química. UNAM México D F México.
- Jiménez-Cisneros, B. E. 2001. La contaminación Ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. 1ª Edición Editorial LIMUSA México. D.F. México.
- Kneidinger, Ch. 1997. Construction and investigation of a constructed wetland system for the tertiary treatment of the maize processing industrial wastewater (Construcción e investigación en un sistema de humedales artificiales para el tratamiento terciario de aguas residuales del procesamiento de industrial de maíz). Tesis Master of Engineering. Universidad BOKU de Viena. Mayo. Viena, Austria.
- Lara-Borrero, J. A. 1998. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis de maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Luna-Pabello, V.; Durán de Bazúa, C.; Ramírez-Carrillo, H.; Fenoglio-Limón, F., Sánchez-García, H. 1997. Sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de humedales artificiales. Una tecnología alterna para la protección del equilibrio ecológico en zonas urbanas. En Memorias de la III Jornadas Panamericanas. Medio Ambiente y Vivienda. Pp. 78-83. Zacatecas, México.

Metcalf y Eddy. 1991. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización 3ª Edición. Editorial McGraw-Hill. Nueva York, EEUUA.

Millán-Hernández, S E. 2000. Operación de una planta piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal para tratamiento de aguas residuales y su reúso para riego. Tesis profesional, Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Netter, B. 1990. Sewage treatment by planted soil filters. En Memories of Constructed Wetland Water Pollution Control. Reino Unido. Pp. 525-528.

Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Referente a la toma y transporte de muestras de agua y aguas residuales. Norma autorizada por la Secretaría de Economía. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Mexicana NMX-AA-007-1980. Referente a la medición de temperatura de muestras de agua y aguas residuales. Norma autorizada por la Secretaría de Economía. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Mexicana NMX-AA-008-1980. Referente a la medición de pH de muestras de agua y aguas residuales. Norma autorizada por la Secretaría de Economía. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Norma Mexicana NMX-AA-004-1977. Referente a la medición de sólidos sedimentables de muestras de agua y aguas residuales. Norma autorizada por la Secretaría de Economía. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles en las aguas tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-1997. Proyecto de norma 2000. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de fabricación de fertilizantes excepto la que produzca ácido fosfórico como producto intermedio. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997. Referente a fosas sépticas prefabricadas. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

Oaxaca-Grande, A. M. 1997. Estudio comparativo para la determinación de la demanda química de oxígeno entre el método estándar de reflujo abierto y el método colorimétrico (rápido) de reflujo cerrado. Tesis profesional, Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. S.E.P., S.E.I.T., D.G.I.T., Orizaba, Veracruz, México.

Ramírez-Carrillo, H. F. 1998. Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. Tesis profesional, Ingeniería Química. F.E.S. Zaragoza, UNAM, México D.F. México.

Santaella, C. 2002. Comparación de dos métodos, NMP y A-1 para coliformes fecales para evaluar la calidad sanitaria de las paletas heladas de agua. Tesis profesional. Escuela de Química. Universidad La Salle México D.F. México.

Schaller, P. 1998 Planning, construction, and investigation of a constructed wetland for the secondary treatment of domestic wastewater in Mexico City (Planeación, construcción e investigación de un humedal artificial para el tratamiento secundario de aguas residuales en la Ciudad de México). Tesis Master of Engineering. Universidad BOKU de Viena. Septiembre. Viena, Austria.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Soto-Esquivel, M. G. 1997. Tratamiento terciario de aguas residuales agroindustriales mediante el uso de reactores con plantas hidrofitas flotantes (Hydrocotyle ranunculoides). Tesis profesional, Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM, México D F. México

Soto-Esquivel, M. G. 2003. Efecto de la generación de oxígeno fotosintético en un sistema sólido-líquido-gas. Tesis Maestría en Ingeniería (Ambiental). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, México D F. México.

Tsukamoto, R. Y. 2002. Tratamiento Primario Avanzado: El paradigma moderno de tratamiento de aguas residuales sanitarias 1ª de 3 partes. Agua Latinoamérica, Marzo/Abril. Vol. 2, núm. 2.

REFERENCIAS CONSULTADAS (SIN CITAR EN EL TEXTO)

Bogdanowicz, R. 1996. Ecotechnology in wastewater management- functioning facilities in the Baltic Region. En Memories of 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Poster 3. Viena, Austria.

Conley, L. M. 1991. An assessment of the root zone method of wastewater treatment. JWPCF, 63:239.

Cooper, P., Green, B. 1995. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom - The first 10 years experience. Wat Environ. Res., 32(3):317-327.

Corona-Martínez, M., Santillán-Pineda, J. C. 1998 Análisis de la normatividad para la descarga de aguas residuales de tipo industrial. Tesis profesional, Ingeniería Química. F. E. S. Zaragoza. UNAM. México D. F. México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- Daubenmire, A. 1982 Autoecología de las plantas. Limusa México, D.F. México.
- Green, M. B., Upton, J. 1995. Constructed reed beds: Appropriate technology for small communities. Wat Environ. Res. 32(3):339-348.
- Haberl, R. 1997. Constructed Wetlands in Europe with emphasis to Austria. En Proceedings of the 1997 Third International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues. Eds. C. Durán de Bazúa y L.I. Ramírez Burgos. Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8. Pp. 232-245. México D. F. México.
- Hammer, D. A. 1989. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial and Agricultural. Editorial Lewis Publishers. Boca Raton, FL, EEUUA.
- Hu, K. P. 1991. Overview: design of subsurface flow constructed Wetland systems. Shanghai Environ. Sci., 8(9):7-12.
- Kadlec, R. H. 1995. Overview: Surface flow constructed Wetlands. Wat Environ. Res., 32(3):1-12.
- Laber, J., Haberl, R., Shrestha, R. 1999. Two - Stage Constructed Wetland for Treating Hospital Wastewater in Nepal. Wat. Sci. Technol., 40(3):317-324.
- Ottová, V., Balcarová, J., Vymazal, J. 1997. Microbial characteristics of constructed wetlands. Wat. Sci. Technol., 35(5):117-123.
- Perry, R.H., Green. D.W. 1999. Perry's Chemical Engineers' Handbook. MacGraw-Hill, Nueva York, EEUUA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- Ramírez, H. F., Fenoglio, F. E., Durán-de-Bazúa, C., Luna-Pabello, V. M. 1997. Evaluación de la conductividad hidráulica y eficiencia de remoción de compuestos orgánicos en columnas empacadas con grava. En Proceedings of the 1997 Third International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues. Eds. C. Durán de Bazúa y L.I. Ramírez Burgos. Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8. Pp. 191-196. México D. F. México.
- Reed, S. C. 1992. Constructed Wetland design - The first generation. Wat. Environ. Res., 64(6):776-782.
- Reed, S. C. 1995. Subsurface flow Wetlands - A performance evaluation. Wat. Environ. Res., 76(2):244-299.
- Ríos, R., Jansson, M., Zibuschka, F., Habert R., Luna-Pabello, V. M., Durán de Bazúa, C. 1997. Removal of microorganisms from wastewater by constructed wetlands. En Proceedings of the 1997 Third International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues. Durán de Bazúa y L.I. Ramírez Burgos (Eds.). Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8 México D. F. México. Pp. 246-251.
- Rivera, F., Calderón, A. 1993. Biotratamiento de aguas negras. ICYT, 15(203):12-15.
- Wood, A. 1995. Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. Wat. Environ. Res. , 32(3):21-29.
- Wynn, T. M, Liehr, S. K. 2001. Development of a constructed subsurface – flow wetland simulation model. Ecological Engineering, 16: 519–536.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN