



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO DE UN
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL A NIVEL
PROTOTIPO**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

ERNESTO ADRIÁN MAYA JASSO



MÉXICO D.F

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: MARÍA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ

VOCAL: Profesor: RODOLFO TORRES BARRERA

SECRETARIO: Profesor: ALFONSO DURÁN MORENO

1er SUPLENTE: Profesor: MARISELA BERNAL GONZÁLEZ

2º SUPLENTE: Profesor: ROLANDO SALVADOR GARCÍA GÓMEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL Y DE QUÍMICA AMBIENTAL

ASESOR DEL TEMA:

**PROFESORA DRA. MARÍA DEL CARMEN
DURÁN DOMÍNGUEZ DE BAZÚA**

SUSTENTANTE:

ERNESTO ADRIÁN MAYA JASSO

RECONOCIMIENTOS

A Dios:

Ese padre que a diario cuida e instruye mis pasos, dando licencia para poder vivir y disfrutar en este mundo.

A Cristo:

Por enseñarme a crecer con fe e inspirar mi propio destino con su luz.

A mis papás:

Margarita Jasso Padilla, por todo ese amor y paciencia puesta a lo largo de mi vida, Jorge Maya Núñez por pertenecer a este siglo.

A mis hermanos:

Alex Maya Jasso y Arthur Maya Jasso, por crecer siempre juntos en esta selva inevitable de concreto.

A Urso:

Por expresar con su amor la paz de nuestro universo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por brindarme la oportunidad de aceptarme como pasante y después como estudiante, perteneciendo como un miembro más de esta enorme institución.

A la Dra. Carmen Durán:

Por su paciencia e instrucción en cada palabra brindada para la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Alfonso Durán:

Por sus conocimientos compartidos en la redacción de este material.

Al Ing. Rodolfo Torres:

Por sus comentarios expuestos en la realización de este trabajo.

Al Colegio de Bachilleres Plantel 08 (Cuajimalpa):

A cada uno de mis compañeros que estuvieron a lo largo de mi instrucción explorando el camino en esta institución, Iliana Renedo, Adrián Martínez, Salvador Medina, Arturo Monreal, Guillermo Varinas, Cirilo Raya, Armando Meneses, Diana Carrasco, Elena Salazar, Gisela Gil, Francisco Hernández, etc.

Al Profesor Q.F.B. Roberto Razo por inspirarme la Química del Universo.

Al Profesor Constantino, por enseñarme las letras en la literatura.

A la Subdirectora Araceli, por impulsar el talento.

A todos mis compañeros de la Generación 96 UNAM:

A mis amigos Suanwy Ariadna, Roberto, Arturo, Eliza Romero, Erick y su esposa Mónica, Alicia Romero, Brenda, Carlos Correo, Eduardo Macias, Goreti, Tomás Medina, Juan Hernández, Julio, “Chiquilín”, “Calambres”, “Piedra”, “Santuche” Mauro, René, etc., por brindarme su mano en algún momento, y a los EE, a Mauricio, Sergio Ramírez, por seguir sobreviviendo en este mundo.

A todo el personal del PIQAyQA:

Sra Irene, Servando, Juan, Gerardo, Don Brígido, Benjamin, Sra. Jose por el apoyo.

A mis inseparables enemigas, Ensueño y Violeta que brindan su conocimiento.

A Leonardo Cabrera, por alimentar siepre el alma.

Ana Lilia Mata por escucharme.

A la empresa Liverpool:

A mis amigos Jéssica Domínguez, Rosa María Morales, Esteban Sánchez, José Luis Ruvalcaba, Adrián Vallejo, Alex Rebollar, Ana Gasca Vilchis, Antonio Torres, Bernardo, Enfermera Bertha Rosas, Carmelita, Claudia Moreno, Edith López, Erika Akino, A mi amiguis Gabriela Cruz, Gina García Flores, por discutir a diario, a la hermosa muñeca Gudelia García, al Licenciado Julio Cano, a Liliana González, Luisa Vargas, al gran Marcos, a la cuñada Maribel Roa, a Marina Benítez por ver en mí una luz de vida, Martha Vilicaña y Ana Gasca, por tantos momentos dulces, Belen y su hermana Zugeil, al buen Chucho, al Osama, al Jefe Raúl Amador y Miguel Salas, y a todos los que me brindaron su manto de luz.

A toda La Familia Valdecasas.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	13
GLOSARIO	16
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	31
I.1. Problemática global del agua	31
I.2. Calidad del agua en México	34
I.3. Sistemas de tratamiento de aguas residuales en México	36
I.4. ¿Qué es un humedal artificial?	39
I.5. Humedales artificiales en México	40
I.6. Objetivo	43
I.7. Actividades	43
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	44
II.1. Ecosistema: Humedales artificiales	44
II.1.1. Humedales artificiales de flujo vertical	46
II.1.2. Humedales artificiales de flujo horizontal	47
II.2. Componentes de un humedal	47

ÍNDICE

	Pág
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	68
III.1 Visitas de reconocimiento	68
III.2 Visitas de realización de tareas de mantenimiento preventivo y correctivo	70
III.3 Realización de las tareas preventivas y correctivas	71
III.4 Métodos analíticos de seguimiento del sistema	71
III.5 Entrega del sistema listo para la operación	72
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
IV.1. Visitas de reconocimiento. Medidas de remediación	73
IV.2. Evaluación de la operación del sistema a escala prototipo de la zona cultural de la ciudad universitaria	75
IV.3. Estado de los sistemas de sedimentación primaria (fosa séptica y sedimentador primario)	83
IV.3.1. Estado del temporalizador	86
IV.3.2. Estado de la tubería de alimentación al humedal	87
IV.4. Mantenimiento preventivo y correctivo al reactor (humedal artificial de flujo vertical descendente)	88
IV.5. Consideraciones finales	89

ÍNDICE

Pag

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	132
ANEXOS	94
ANEXO 1. ACERVO FOTOGRÁFICO	94
ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTALES	101
LISTADO DE FIGURAS	
Figura 1.1	Plano de los Estados Unidos Mexicanos (México) 33
Figura 2.1	Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal 45
Figura 2.2	Plantas acuáticas comunes 50
Figura 2.3	Esquema típico de planta emergente 51
Figura 2.4	Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial 58
Figura 3.1	Diagrama de bloques de la metodología seguida en esta investigación 70
Figura 4.1	Zona cultural de la UNAM 73
Figura 4.2	Humedal artificial de flujo vertical 76
Figura 4.3	Paredes de concreto del HAFVD 89
Figura 4.4	Recubrimiento de PPE en las paredes del HAFVD 89
ACERVO FOTOGRÁFICO	
Figura A-1	Sedimentador primario del HAFVD (fosa séptica) 95
Figura A-2	Tubería de alimentación al HAFVD (fosa séptica) 95
ÍNDICE	
Figura A-3	Tanque homogenizador o sedimentador primario II 96

Figura A-4	Tapa del homogenizador o sedimentador primario II	96
Figura A-5	Válvula de alimentación al HAFVD	97
Figura A-6	Bomba de alimentación al HAFVD	97
Figura A-7	Válvula de alimentación al HAFVD	98
Figura A-8	HAFVD a un lado del taller de composta	98
Figura A-9	HAFVD	99
Figura A-10	Acercamiento al HAFVD para ver la geomembrana	99
Figura A-11	Fotografía de extracción de carrizos para experimentos en el sistema de HAFVD a escala de laboratorio	100
Figura A-12	Trabajos de poda del HAFVD por personal de la UNAM	100

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1.	Principales giros industriales responsables de las mayores cargas de aguas residuales en México (SEDUE, 1990)	36
Tabla 1.2.	Relación de plantas de tratamiento de aguas negras del Distrito Federal (incluyendo la de Ciudad Universitaria, que es experimental)(CADF,2007)	37
Tabla 2.1.	Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales (Anónimo, 2006)	53
Tabla 2.2.	Contaminantes y sus efectos potenciales (Anónimo, 2006)	57
Tabla 2.3.	Patógenos en aguas residuales (Anónimo, 2006)	61
Tabla 2.4	Hoja técnica del humedal artificial	67

ÍNDICE

		Pág.
Tabla 4.1	Listado de los equipos que requiere de mantenimiento preventivo	75

Tabla 4.2	Cronograma de actividades	77
Tabla 4.3	Acciones preventivas y correctivas	79

ANEXO 2 DATOS EXPERIMENTALES

Tabla A-1	Conductividad del mes febrero	102
Tabla A-2	Sólidos totales del mes de febrero	103
Tabla A-3	Valores de pH total del mes de febrero	104
Tabla A-4	Temperatura del mes de febrero	105
Tabla A-5	Demanda química de oxígeno del mes de febrero	106
Tabla A-6	Conductividad del mes abril	107
Tabla A-7	Sólidos totales del mes de abril	108
Tabla A-8	Valores de pH total del mes de abril	109
Tabla A-9	Temperatura del mes de abril	110
Tabla A-10	Demanda química de oxígeno del mes de abril	111
Tabla A-11	Conductividad del mes junio	112
Tabla A-12	Sólidos totales del mes de junio	113
Tabla A-13	Valores de pH total del mes de junio	114
Tabla A-14	Temperatura del mes de junio	115
Tabla A-15	Demanda química de oxígeno del mes de junio	116
Tabla A-16	Conductividad del mes agosto	117
Tabla A-17	Sólidos totales del mes de agosto	118

ÍNDICE

		Pág.
Tabla A-18	Valores de pH total del mes de agosto	119
Tabla A-19	Temperatura del mes de agosto	120
Tabla A-20	Demanda química de oxígeno del mes de agosto	121

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

Tabla A-21	Conductividad del mes septiembre	122
Tabla A-22	Sólidos totales del mes de septiembre	123
Tabla A-23	Valores de pH total del mes de septiembre	124
Tabla A-24	Temperatura del mes de septiembre	125
Tabla A-25	Demanda química de oxígeno del mes de septiembre	126

RESUMEN

Para resolver los problemas asociados a la generación de aguas residuales por la mayoría de las comunidades del mundo, especialmente de zonas de bajos recursos, las universidades realizan programas de investigación para coadyuvan a resolverlos. Estos estudios teóricos y experimentales para reducir el problema de la contaminación del agua por lo general están asociados a la formación de estudiantes y, por tanto, incluyen diferentes aspectos de su operación con la meta última de conseguir un uso del agua de manera racional. En esta investigación se estudió un humedal artificial, que es un sistema de tratamiento de aguas residuales que simula a los sistemas naturales, en el que el agua residual proveniente de algunas oficinas administrativas de la UNAM fluye subsuperficialmente en forma vertical. El sistema tiene 2.5 m de ancho y 6.0 m de largo y su profundidad es de 1.3 m. El reactor está construido de cemento y recubierto con una geomembrana de polipropileno. Está relleno de escoria volcánica y las hidrofitas provienen del lago de Xochimilco (zacaltules, tules y carrizos). La red de tuberías es de polietileno de alta densidad. El sistema inicio operaciones en 1999 y desde entonces se han formado varios estudiantes, no solamente de la UNAM, sino de otras instituciones nacionales y extranjeras. Un problema asociado a su operación es que requiere de supervisión continua ya que cuenta con dos sedimentadores primarios (una fosa séptica que ya existía y un sedimentador que funciona como tanque de homogeneización de la alimentación de agua residual al humedal). El agua residual se alimenta por bombeo en forma intermitente (controlándose el arranque y paro de la bomba por medio de un temporizador). Como los estudiantes que se han ido formando en este sistema no llegan y se marchan en forma continúa, el sistema pasa tiempos “muertos” en los que no se le da mantenimiento, lo que ocasiona que se dañen las partes mecánicas y que se azolven los sedimentadores. El objetivo de esta investigación fue el de rehabilitar este sistema de humedales artificiales de flujo vertical a escala prototipo para el tratamiento de aguas residuales dejándolo listo para ser operado nuevamente con un tiempo de residencia hidráulico específico de 3 días. Se revisaron los sistemas de tuberías para reparar aquéllas que se encontraron

dañadas. Para mantener el sistema por tiempo indefinido se recomienda que se realice por lo menos una revisión exhaustiva cada 15 días para el buen funcionamiento del humedal y sus componentes de tubería. Se revisó el sedimentador primario I (fosa séptica que sirve como colector de las aguas residuales de las oficinas de una pequeña fracción de la Zona Cultural) para evitar que se arrastren sólidos suspendidos al sedimentador primario II y de éste al humedal. Se recomienda que los trabajos de desazolve se lleven a cabo cada seis meses (dos veces al año), para que no exista una acumulación de materia orgánica dentro del sistema. Se revisó el sedimentador primario II y se pudo notar que existía una acumulación de material orgánico arrastrado de la fosa séptica, que no permitía un adecuado funcionamiento del sistema. Se recomienda realizar inspecciones mensuales para verificar detalladamente la operación del sedimentador primario II, para que el agua residual que reciba el humedal no contenga material en suspensión que azolve el material de empaque del reactor. Se revisó el sistema de alimentación automatizada, que empleaba un temporizador para alimentar en forma discontinua cada cuatro horas. Dado que el sistema ya no funcionaba y no se pudo reparar el temporizador, se optó por solicitar su reemplazo y, temporalmente, el humedal está operando en forma manual con un gasto de alimentación diario equivalente al tiempo de residencia hidráulico de 3 días. Cuando el temporizador de reemplazo sea colocado esta alimentación manual ya no será necesaria. Las recomendaciones a la luz de las tareas realizadas en esta investigación son las siguientes: 1. En esta investigación de tipo teórico-experimental se detectaron algunos problemas de tipo operativo. Estos se debieron a fallas de tipo preventivo y correctivo, que existían en la operación del sistema, así como a la necesidad de realizar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo de cada uno de los accesorios que componen al sistema y 2. Uno de los principales problemas es la acumulación de materia orgánica dentro de los sedimentadores primario I (fosa séptica) y el sedimentador primario II (tanque homogeneizador), por lo que es importante que la bitácora de mantenimiento se revise cada mes para solicitar a tiempo la limpieza de la fosa séptica con el personal de la UNAM responsable de esa operación. Se realizaron análisis de las aguas residuales de entrada y salida al y del humedal artificial (pH,

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

temperatura, conductividad eléctrica y contenido de material disuelto medido como demanda química de oxígeno) con objeto de verificar la estabilidad del sistema. El Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, entidad responsable de estas instalaciones, está en proceso de firmar un acuerdo interno de cooperación académica con el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, CCH Sur, con objeto de que se utilice con fines de docencia, además de sus funciones de investigación y de demostración de la bondad de esta ecotecnología. Esto permitirá que los profesores del CCH Sur de las asignaturas de Biología y Química apoyen a la Facultad de Química en las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo en compañía de sus estudiantes motivándolos a conocer sistemas de tratamiento de aguas residuales amigables con el ambiente.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA GLOBAL DEL AGUA

1.1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento de suma importancia para la subsistencia de la especie y su entorno. Esto se ha visto corroborado con la evolución de las especies a través de los años. El agua desde sus inicios de la historia se ha visto envuelta como un importante e irrevocable fuente de vida para todo ser que habita sobre y dentro de la Tierra. La Tierra está cubierta en un 70% y tan sólo el 30% de su superficie es tierra firme. Sin embargo, la mayoría del agua es salada ya que el 97.5% del agua es el agua de los mares y de los océanos y el restante 2.5% es agua dulce. Desafortunadamente, casi toda está congelada (en los polos, en los glaciares). El agua congelada representa el 69.7% del agua dulce, el agua subterránea representa el 30% y en los ríos y en los lagos solamente se encuentra el 0.3% de agua dulce. Para uso humano directo se puede acceder a menos del 1% del agua dulce superficial y subterránea del planeta (IMAC, 2007).

Por ello, los recursos hidrológicos son de vital importancia para el desarrollo socioeconómico mundial y México no es la excepción. Sin embargo, la gran diversidad fisiográfica y climática del país hace que el agua no esté distribuida regularmente (INE, 2007).

En México hay un promedio anual de 780 mm de precipitación pluvial, que corresponde a un volumen de 1 532 millones de m³; en la zona norte y en el altiplano (52% del territorio). La media anual es inferior a los 500 mm, y en sólo una porción del sureste (7% del territorio) la precipitación alcanza valores superiores a los 2000 mm anuales (CNA, 2007).

La precipitación ocurre en dos ciclos anuales. El más importante tiene lugar de mayo a noviembre y concentra el 80% de las lluvias, debido a que en esta

temporada aparece el mayor número de huracanes y tormentas tropicales. El segundo ciclo ocurre de noviembre a abril y obedece a invasión de masas de aire polar (“nortes”) que afectan gran parte del territorio nacional (CNA, 2007).

La gran diversidad orográfica del país tiene influencia en la precipitación, en especial las Sierras Madre Occidental y Oriental sobre el altiplano. La mayor parte de las lluvias provenientes de los océanos chocan con las serranías y caen en las vertientes, mientras que en el altiplano y la mesa central del país sólo descargan las que sobrepasan los macizos montañosos.

En gran medida, la distribución orográfica y climática origina que la mayor parte del territorio sea de zonas semiáridas y tenga una gran variedad de ecosistemas. Se considera que el 50% del escurrimiento anual total se concentra en los ríos más caudalosos ubicados en el sureste del país y cuya región hidrológica comprende sólo el 20% de la superficie total del territorio (Figura 1.1).

El agua se encuentra disponible en escurrimientos superficiales cuyo volumen promedio se estima en 410,164 millones de m³ anuales. Estos escurrimientos se distribuyen en 320 cuencas hidrológicas. En la vertiente del Pacífico las más importantes son las de los ríos Yaqui, Fuerte, Mezquital, Lerma, Santiago y Balsas y en la vertiente del Golfo de México las cuencas de los ríos Bravo, Pánuco, Papaloapan, Grijalva y Usumacinta, y la del río Nazas entre las cuencas endorreicas (CNA, 2007).

Se considera que el volumen medio anual de los ríos en México es de 360 millones de m³. Cerca del 60% de este caudal lo aportan siete ríos que drenan el 27% del territorio, lo que indica una distribución desequilibrada (CNA, 2007).



Figura 1.1. Plano de los Estados Unidos Mexicanos (México)

La distribución del agua es un problema grave debido a que el 80% de los recursos hídricos se encuentran por debajo de los 500 m sobre el nivel del mar y a un nivel mayor se encuentra asentada más del 70% de la población total y se desarrolla el 80% de la actividad industrial. El 55% de la actividad industrial se encuentra en el Valle de México a más de 2000 m de altitud lo que genera graves problemas de abastecimiento de agua (CNA, 2007).

El agua subterránea es otra fuente importante de este recurso, sobre todo en aquellas regiones donde no existen escurrimientos superficiales considerables. Se ha estimado en 17,406 millones de m³ el promedio de la recarga anual y en 16,395 millones de m³ de extracción, así como en 110,350 millones de m³ el volumen total de almacenamiento (CNA, 2007).

Para aprovechar este recurso el país cuenta con un sistema de obras hidráulicas para almacenamiento de 125,000 millones de m³ y en lagos y lagunas 14,000 millones de m³ que en total corresponde al 34% del escurrimiento anual. Se estima que se pierden por evaporación 9,300 millones de m³ anuales en los cuerpos de almacenamiento del país (CNA, 2007).

1.2. CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO

“No acabaremos con el SIDA, la tuberculosis, la malaria ni ninguna de las demás enfermedades infecciosas que asolan al mundo en desarrollo hasta tanto no hayamos ganado también la batalla para asegurar la disponibilidad de agua potable, saneamiento y asistencia sanitaria básicos” (Kofi Annan, Secretario General de las Naciones Unidas). “La década 2005-2015 se revela como crucial para centrar la atención internacional en lo que debería ser obvio: el agua es una fuente de vida. Además de demostrar su compromiso personal mediante la organización de eventos en torno al Día Mundial del Agua, resultará esencial que contribuya a que el decenio que finaliza en 2015 sea decisivo para que todos tomemos conciencia de la urgencia de lograr los objetivos establecidos. Todos los eventos que se organicen o todas las voces que se alcen resultarán fundamentales para cambiar una situación que no debemos seguir tolerando” (OMS, 2008a). “Cada año, más de mil millones de seres humanos se ven obligados a recurrir al uso de fuentes de abastecimiento de agua potencialmente nocivas. Este hecho perpetúa una crisis humanitaria silenciosa que acaba con la vida de unos 3900 niños al día e impide lograr los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). El fracaso colectivo para abordar este problema se traduce en unas perspectivas de futuro muy poco esperanzadoras para los miles de millones de personas que viven atrapados en una espiral de pobreza y enfermedad” (OMS, 2008a).

“La escasez cada vez mayor de las aguas dulces debido al crecimiento demográfico, a la urbanización y, probablemente, a los cambios climáticos, ha dado

lugar al uso creciente de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura, la recarga de aguas subterráneas y otras áreas. En algunos casos, las aguas residuales son el único recurso hídrico de las comunidades pobres que subsisten por medio de la agricultura. Si bien el uso de aguas residuales en la agricultura puede aportar beneficios (incluidos los beneficios de salud como una mejor nutrición y provisión de alimentos para muchas viviendas), su uso no controlado generalmente está relacionado con impactos significativos sobre la salud humana. Estos impactos en la salud se pueden minimizar cuando se implementan buenas prácticas de manejo” (OMS, 2008b).

Se estima que el volumen de aguas residuales generado en todo el país es de poco menos de 300 m³/s de los cuales una tercera parte es aportado por los centros urbanos del Distrito Federal, Guadalajara y Monterrey. Actualmente se calcula que alrededor del 85% de las aguas residuales son descargados sin recibir tratamiento alguno. El 15% restante es depurado, en cerca de 400 plantas, de las cuales algunas reciben descargas de tipo doméstico y de cuyos efluentes solo la mitad es reutilizada. De estas plantas, el 80% no funciona adecuadamente (especialmente las municipales); el restante 20%, trabaja con una eficiencia menor a la que fue proyectada, debido, entre otros factores, a los altos costos de operación y mantenimiento, así como de personal calificado para su manejo óptimo (Ramírez y col., 1997).

El sector industrial en México genera el 43% de las aguas residuales. De acuerdo con datos de la SEDUE (1990), pueden clasificarse como 39 grupos y, según la Tabla 1.1, nueve de ellos general el 82% de ese 43% total.

Tabla 1.1. Principales giros industriales responsables de las mayores cargas de aguas residuales en México (SEDUE, 1990)

Industria	Extracción, %	Consumo, %	Descarga, %
-----------	---------------	------------	-------------

Azucarera	35.2	22.3	38.8
Química	21.7	24.4	21.0
Papel y celulosa	8.2	16.1	6.0
Petróleo	7.2	3.7	8.2
Bebidas	3.3	6.4	2.4
Textil	2.6	2.4	2.7
Siderúrgica	2.5	5.5	1.7
Eléctrica	1.5	4.7	0.7
Alimentos	0.2	0.3	0.2
Resto del sector	0.17	14.1	18.1

1.3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

En México, para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, se cuenta con 361 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con una capacidad instalada de 25 m³/s. Sólo tiene capacidad instalada para tratar el 24% y el 50% del agua tratada es para reutilización (“reúso”) y no para el control de la contaminación. En la industria hay 282 plantas para el tratamiento de sus aguas residuales, con una capacidad instalada de 20 m³/s. Del 43% del total de aguas residuales que genera la industria sólo tiene capacidad para tratar el 25% de ellas. Se estima que sólo el 50% de las plantas operan regularmente. En la Tabla 1.2 se presenta como ejemplo el listado de las plantas de tratamiento de aguas residuales del Distrito Federal (CADF, 2007).

Tabla 1.2. Relación de plantas de tratamiento de aguas negras del Distrito Federal (incluyendo la de Ciudad Universitaria, que es experimental) (CADF, 2007)

PLANTA	CAPACIDAD INSTALADA (L/s)	CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO (L/s)	%	INICIO DE OPERACIONES
CERRO DE LA ESTRELLA	2 000	1 800	90	1971
XOCHIMILCO	1 250	0	0	1959
SN JUAN DE ARAGÓN	500	300	60	1964
CIUDAD DEPORTIVA	230	230	100	1958
CHAPULTEPEC	160	160	100	1956
ACUEDUCTO DE GUADALUPE	80	0	0	1982
CIUDAD UNIVERSITARIA	40	--	--	1982
EL ROSARIO	25	22	88	1981
BOSQUES DE LAS LOMAS	55	22	40	1973
TOTAL	4 340	2 534	59	

La eutrofización deteriora la calidad de las aguas superficiales, produciendo problemas en el medio ambiente y en el proceso de potabilización del agua. Esto ha obligado a limitar el contenido de nutrientes responsables de la eutrofización (nitrógeno y fósforo) en las aguas residuales urbanas depuradas, por lo que son necesarias tecnologías para complementar los actuales sistemas de tratamiento (Durán-de-Bazúa, 1994). Los humedales naturales poseen una elevada capacidad para eliminar estos nutrientes, pero un adecuado control del proceso requiere instalaciones cerradas.

Existen experiencias sobre humedales artificiales como eficaz tratamiento terciario de bajo costo, aunque no se conocen a gran profundidad los procesos implicados en este tratamiento de agua. Se han construido humedales artificiales experimentales a pequeña escala, cuyos resultados iniciales indican la viabilidad de esta tecnología bajo las condiciones climáticas de la región, como lo es en sí México. En todo caso, los estados que contengan un clima templado serán los más idóneos para la implementación de estos sistemas (Rodríguez-Cruz y Varela-Montellano, 2003).

“Desde 1997, la Secretaría de la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), el Departamento de Estado de los EE.UU. y el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los EE.UU. han venido operando la iniciativa de formación **Fondo Humedales para el Futuro (FHF)** para el hemisferio occidental, con el fin de beneficiar a instituciones e individuos latinoamericanos y del Caribe a través de la capacitación y el entrenamiento en conservación de humedales. Esta actividad promueve el concepto de “uso racional” de los humedales, fortaleciendo la capacidad de los países de manejar a perpetuidad los recursos de sus humedales y contribuyendo a integrar la conservación y el manejo de los mismos en el proceso de desarrollo. Todas las actividades propuestas han de concordar con los principios, las recomendaciones y los lineamientos de la Convención de Ramsar, Irán” (RAMSAR, 2008).

1.4. ¿QUÉ ES UN HUMEDAL ARTIFICIAL?

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

Estos sistemas aprovechan las características de depuración natural de los microorganismos. De este modo, las características fundamentales de depuración biológica de los HA son similares a los de las lagunas de degradación facultativas (Metcalf y Eddy, 1991), pero combinan además las ventajas de tener un material de empaque, que sirve como soporte a los microorganismos además de servir como material filtrante de sólidos suspendidos y como superficie de adsorción de metales pesados (Netter, 1993).

Otra característica adicional de los HA es que, al utilizar plantas sembradas sobre el lecho de soporte, generan condiciones tales que favorecen el desarrollo de microorganismos en la zona de la rizosfera, ayudan a la oxigenación de esta zona y contribuyen de manera significativa a la depuración del agua, pues toman de está los nutrimentos presentes, tales como fósforo y nitrógeno (Haberl, 1997).

Los factores más importantes para su adecuada operación son:

- El pH.
- La temperatura.
- La intensidad luminosa.
- La presión del oxígeno.
- Los sedimentos orgánicos e inorgánicos que tienden a incrementarse al acercarse al fondo.
- Las macrofitas que constituyen un depósito de carbono y de nutrientes.

1.5. HUMEDALES ARTIFICIALES EN MÉXICO

México, un país rico en recursos naturales, obtiene el agua que consume la población de fuentes tales como ríos, arroyos y acuíferos del subsuelo. Estos acuíferos se recargan de forma natural en época de lluvias. Sin embargo, la época de lluvias tiene una duración promedio de cuatro meses lo que propicia una escasa captación. Aunado a esto, del total de agua captada por lluvias aproximadamente el 70% se evapora. La desproporción que existe entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento y las extensiones territoriales que comprenden aunado a la corta temporada de lluvias hace que la disponibilidad del agua sea cada vez menor (CNA, 2007).

Bajo este panorama, México se enfrenta actualmente a graves problemas de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua. Parte de esta problemática, se enfrenta con la construcción de la infraestructura hidráulica que permite satisfacer de agua a los diferentes sectores de la población: el agrícola, el industrial, el doméstico y de servicios y para la generación de energía eléctrica, entre otros. No obstante existen diferencias territoriales importantes que son desfavorables. Como ya se mencionó arriba, en el norte del territorio nacional, el agua de lluvia que se capta por escurrimiento es únicamente el 4% mientras que en el sur-este y las zonas costeras se logra captar el 50% del escurrimiento. Así, entre otros beneficios de la infraestructura hidráulica se encuentra la protección a la población y las áreas productivas de situaciones como las inundaciones, además de aprovechar las zonas con alto promedio de escurrimientos para la generación de servicios como la energía eléctrica. La zona norte del país está constituida por regiones áridas y las presas tienen la función de captar el agua que se utilizará en la actividad agrícola. En la zona sur del país, donde se localizan las regiones húmedas, las presas tienen como función almacenar el agua para la generación de la energía eléctrica y el control de avenidas.

En los últimos años se ha contemplado que el deterioro de los mantos acuíferos y las reservas de agua, que constituyen una parte importante de agua para el consumo, se han visto invadidas por la descomposición del agua, debido a que sus cauces se encuentran contaminados por especies químicas, físicas y biológicas, provenientes de fuentes emisoras que en un momento se encuentran desbordando una cantidad de materia inerte, (orgánica e inorgánica), causando un desequilibrio ecológico irreversible. Esto es debido principalmente a que en la actualidad la prevención de la contaminación de mantos acuíferos de nuestro territorio no se lleva de acuerdo a programas en los que se implemente la cultura de un rescate del agua antes de ser contaminada.

Con la creación de nuevas tecnologías para un avance en el ramo ambiental, se han visto involucradas la cantidad de desechos de tipo, sólido, líquido, y gaseoso, los cuales son descargados sobre el ambiente y su entorno. Los desechos de tipo líquido en su totalidad, son desembocados sobre los mantos acuíferos, que en la mayoría atrofian la vida existente dentro y fuera de estos, alterando las propiedades físicas y químicas de la misma agua. Es por eso que al implementarse programas para el tratamiento de estas aguas antes de ser vertidas sobre los mares o ríos, se pretenden rescatar una parte del mucho daño que se le ha causado al ecosistema en toda su extensión.

Con la construcción de sistemas de humedales artificiales, especialmente en las zonas urbanas y suburbanas, se pretende mejorar hasta en un 90%, la calidad del agua residual, para una posible utilización en el riego de plantas de tipo forestal o proveniente de zonas verdes como los viveros. Se han implementado estos sistemas para el tratamiento del agua y para llegar a una mayor eficiencia de purificación de esta agua (Durán-de-Bazúa y col., 2003).

Al crear estos sistemas se pretenden minimizar los gastos de recursos en cuestiones energéticas, terrenal y de tipo material. Con esto, en un futuro se pretenderá implementar sistemas que, en su totalidad, puedan enfocar todo su potencial al tratamiento de agua residual de una manera tal, que el costo de

operación sea muy por debajo del de los sistemas en operación en este momento. Para corroborar las mejores condiciones de operación es siempre deseable tener plantas prototipo enfocadas al depuramiento y tratamiento del agua residual que, para el caso de los humedales artificiales, estén basadas en tecnologías de tipo semi-natural.

Para realizar el presente trabajo, la investigación se llevará a cabo en una planta prototipo, basada en el sistema de humedales artificiales de flujo vertical, (HAFV). Ésta se encuentra ubicada en los terrenos de Ciudad Universitaria, en los límites denominados Zona Cultural, en la Universidad Nacional Autónoma de México y su operación está a cargo del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQA y QA), perteneciente a la Facultad de Química de la UNAM.

Este sistema hace la depuración de la materia orgánica presente en el agua residual, así como otros contaminantes presentes en ella, a través de varios mecanismos, el principal es el de microorganismos, los cuales son capaces de depurar el agua residual, fijándose dentro del sistema, en el material de soporte que rellena el humedal y sobre la parte radicular de las plantas acuáticas sembradas en ellos. Por ello, este sistema de tratamiento es muy conveniente en términos económicos, ya que este tipo de tecnología puede hacer frente a la escasez de recursos que se tiene actualmente en México, por lo que se pretende implantarlos en un futuro muy próximo, especialmente en las zonas rurales donde la problemática es más aguda.

1.6. OBJETIVO

El objetivo principal de esta investigación es el de plantear una estrategia para el mantenimiento preventivo y correctivo de un sistema de humedales artificiales de flujo vertical a escala prototipo para el tratamiento de aguas residuales.

1.7. ACTIVIDADES

Las actividades de esta investigación son:

- Revisar los sistemas de tuberías para reparar aquellas que se encuentran dañadas.
- Revisar el sistema de alimentación automatizada, que emplea un temporizador para alimentar en forma discontinua cada cuatro horas.
- Revisar el sedimentador primario para evitar que se arrastren sólidos suspendidos al humedal.
- Revisar la fosa séptica que sirve como colector de las aguas residuales de las oficinas de la Zona Cultural.
- Reiniciar la operación del sistema a un tiempo de residencia hidráulica de 3 días dejándolo listo para su estudio cuando alcance la etapa estable.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

2.1. ECOSISTEMA: HUMEDALES ARTIFICIALES

Los *humedales artificiales* son una *ecotecnología* que permite controlar, distribuir y tratar adecuadamente el *agua residual*, siendo esta agua residual de origen industrial, de casas habitación, escuelas, comercios, etc., que desembocan en tuberías subterráneas de desagüe y, a su vez, en tanques de almacenamiento o sedimentadores. De estos, el agua residual clarificada pasa al humedal propiamente dicho, donde la zona radicular soportada en un medio inerte recibe el agua residual y sus componentes, microorganismos especialmente, transforman los contaminantes disueltos en ella en biomasa celular y biogases de forma aerobia durante el día (con la ayuda del oxígeno fotosintético, principalmente) y anaerobios durante la noche, cuando no hay oxígeno fotosintético lográndose la transformación a gases de una parte importante de la biomasa que se formó durante el día. El agua tratada se envía para su uso en riego (Fig. 2.1).

Se denominan a los humedales artificiales también como “pantanos artificiales” o “filtros con plantas”. En el idioma inglés es común que aparezcan como “Artificial Wetlands”, “Method of the rhizome zone”, “Constructed wetlands”. De cualquier manera, se trata de sistemas de tratamiento de aguas residuales contaminadas, en los cuales los contaminantes disueltos son removidos a través de la vía de degradación aerobia, anaerobia y anóxica, que ocurre entre los organismos que proliferan en el material del lecho y los rizomas de plantas vasculares que se encuentran ahí sembradas, teniendo así un área de tratamiento biológico de tipo pantanoso (Collado-Lara, 1992).

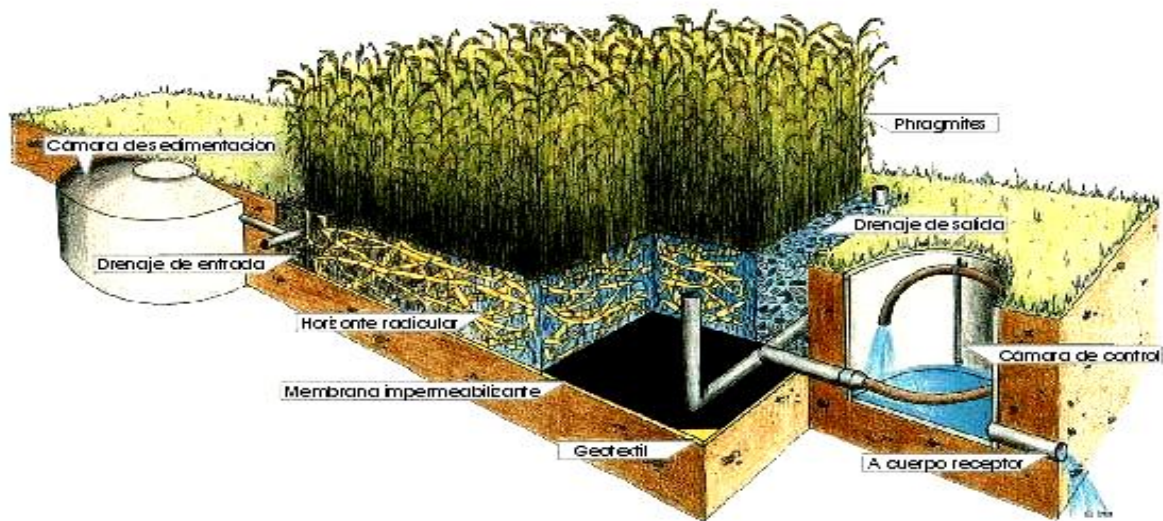


Figura 2.1. Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal

Los humedales artificiales (HA) aplican el principio del tratamiento biológico, el cual está basado en el trabajo de poblaciones de carácter mixto de microorganismos, que utilizan como nutrientes las sustancias que contaminan el agua. Es a través de este mecanismo por el cual las corrientes de aguas naturales, como los ríos y los lagos empleando el principio de humedales naturales se auto-purifican (Winkler, 1986).

Existen dos tipos de tratamientos de aguas residuales, empleando humedales: Los que aprovechan humedales naturales existentes y los que se construyen *ex-profeso* para tratar el agua que se denominan artificiales.

Según varios autores, se establece la siguiente clasificación, en relación con la forma de vida de las plantas o macrófitas (Durán-de-Bazúa y col., 2003; Ríos y col., 1997):

1.- Sistemas de plantas de libre flotación

- lirio acuático, *chichicaxtle* o lentejuela o lenteja de agua, ombligo de Venus (Soto-Esquivel, 1997)
- maleza acuática

2.- Sistemas de plantas sub-emergentes

3.- Sistemas de plantas emergentes (áreas inundadas)

- de flujo superficial
- de flujo sub-superficial (flujo vertical y flujo horizontal) (Brix 1993a,b)

2.1.1. Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

En los sistemas de flujo vertical se requiere de diferentes capas y tamaños de las partículas que forman el empaque o material de soporte de las hidrofitas y los microorganismos depuradores, logrando una buena distribución hidráulica, especialmente porque el agua residual entra en forma intermitente (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998; Fenoglio-Limón, 2003).

Esto permite un incremento de la oxigenación varias veces mayor que las de un sistema horizontal, que tiene un flujo continuo. Durante el periodo de carga hidráulica, el aire es forzado a salir del medio de soporte y durante el periodo de vaciado 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 infiltración y desnitrificación así como la adsorción de fósforo (Brix, 1993a,b).

2.1.2. 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 ligera pendiente que permita el flujo del agua a través del humedal artificial (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, que son tomados por las hidrofitas como nutrientes (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998).

2.2. COMPONENTES DE UN HUMEDAL

Para este proceso de purificación es necesaria la correcta combinación de cuatro características básicas principales, las cuales presentan a continuación (Fenoglio-Limón, 2000):

- 1.- Alimentación del agua residual
- 2.- Lecho o medio de soporte
- 3.- Plantas
- 4.- Microorganismos

1.- Alimentación del agua residual

La alimentación del humedal se lleva a cabo en la parte superior en toda el área superficial del sistema, cuando son de flujo vertical y por un extremo cuando

son de flujo horizontal, infiltrándose el agua de manera gravitatoria a través del medio de soporte.

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en el éxito o fracaso del humedal. Mientras la hidrología de un humedal construido no es muy diferente que la de otras aguas superficiales y cercanas a superficie, difiere en aspectos importantes: Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento. Por esta razón, se han patentado sistemas que contemplan granulometrías específicas que permiten dirigir el flujo del agua por todo el empaque del sistema haciendo el sistema mucho más eficaz para la transferencia de masa de los componentes disueltos en el agua hacia la pared celular de los microorganismos responsables de la transformación bioquímica a gases y nuevas células (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998).

Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas). La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

2.- Lecho o medio de soporte

El medio de soporte o empaque es conocido por los biólogos que estudian estos ecosistemas como substrato. Puede incluir arena, grava, roca y materiales inorgánicos inertes que no proporcionen materia orgánica a los microorganismos para obligarlos a consumir los contaminantes disueltos en el agua residual.

Como los restos de vegetación pueden acumularse en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas y por ello es que la biodegradación nocturna, cuando no hay energía solar para la fotosíntesis es tan importante. El material de empaque, sedimentos, y los restos de vegetación son importantes por varias razones: Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal. La permeabilidad del material de empaque afecta el movimiento del agua a través del humedal. Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar sobre la superficie del empaque. Las características físicas y químicas del suelo y otros materiales de la corteza terrestre se alteran cuando se inundan. En un medio saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un medio anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y la precipitación de metales si el agua residual trae azufre, al formarse sulfuros metálicos.

3.- Plantas

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite la penetración a través del medio de soporte y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Lo más importante en los humedales artificiales es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirven como substrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre (Figs. 2.2 y 3). Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escurrentía de varias maneras:

- Estabilizan el medio de soporte y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos vestigiales o traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y la zona radicular.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del medio de soporte.
- El tallo sumergido y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

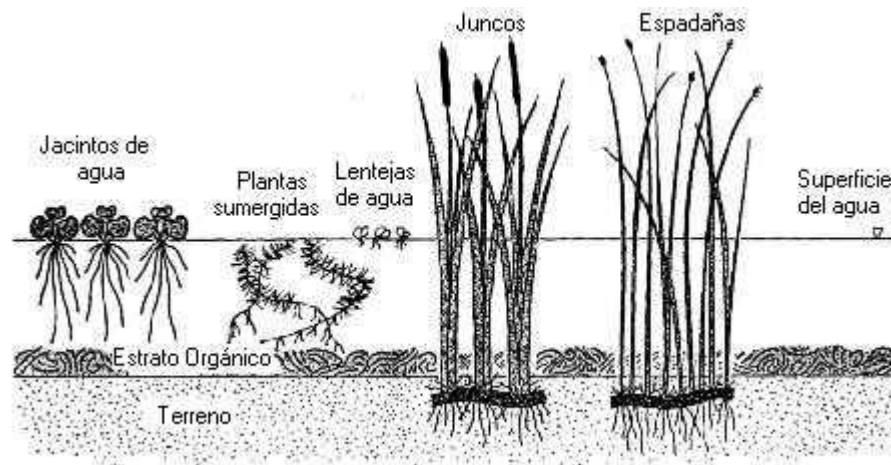


Figura 2.2. Plantas acuáticas comunes

Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales incluyen tules o espadañas, carrizos o juncos y juncos de laguna. Los juncos de laguna y los tules o espadañas o una combinación de estas dos especies, son las dominantes en la mayoría de los humedales artificiales en los Estados Unidos. También existen algunos sistemas con carrizos, siendo esta especie la dominante en los humedales artificiales europeos y de

México, donde se han probado tules, zacatules y carrizos y estos últimos han dominado el área del humedal (Esponda-Aguilar, 2001; Kneidinger, 1997; Schaller, 1998). Cuando se diseñan sistemas que específicamente buscan un incremento en los valores del hábitat, además de conseguir el tratamiento del agua residual, usualmente incluyen una gran variedad de plantas, especialmente para proporcionar alimentación y nido a las aves y otras formas de vida acuática. En la Tabla 2.1 se presentan las especies emergentes más utilizadas en la depuración de aguas residuales usando humedales artificiales.

4. Microorganismos

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios.

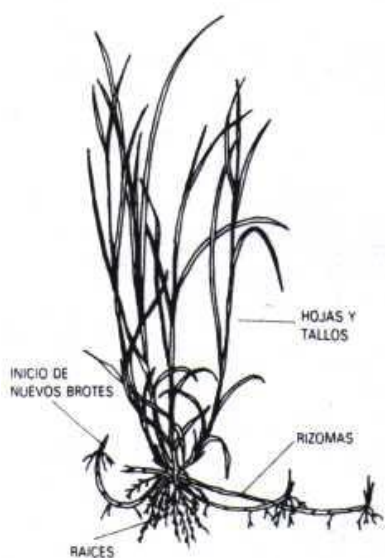


Figura 2.3. Esquema típico de planta emergente

La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. La actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera las condiciones de potencial redox del substrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Algunas transformaciones microbianas son aerobias (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaerobias (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre), como ya se mencionó. Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aerobias y anaerobias en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones ambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer inactivos durante años.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

Aunque otras especies superiores como las aves, los insectos, etc., no son teóricamente parte de un humedal artificial, pueden estar presentes al reducirse las condiciones sépticas. Por ello, para evitar posibles vectores, como los insectos, se alimenta el agua residual en lo que se denomina flujo subsuperficial, esto es, a algunos centímetros por debajo del material de empaque para evitar que tengan un medio acuoso para depositar sus huevecillos.

Tabla 2.1. Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales (Anónimo, 2006)

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i> <i>Eleocharis sp.</i> <i>Scirpus lacustris L. (*)</i>	- - Junco de laguna	14-32 18-27		20	5-7.5 4-9
Gramíneas	<i>Glyceria fluitans (L.) R. Br.</i> <i>Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel (*)</i>	Hierba del maná Carrizo	12-23	10-30	45	2-8
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Juncos	16-26		20	5-7.5
Tifáceas	<i>Thypha sp (*)</i> .	Eneas, aneas, espadañas.	10-30	12-24	30	4-10

(*)Especie más utilizada entre todas.

Los animales invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus consumiendo materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significantes de materia durante sus fases larvales. Los invertebrados también tienen varios papeles ecológicos; por ejemplo, las ninfas de la libélula son rapaces importantes de larvas de mosquito. Aunque los invertebrados son los animales más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, pájaros y mamíferos, que son indicadores de que la calidad del agua ha mejorado.

La protección de la salud pública es el propósito fundamental del tratamiento del agua residual y le sigue en importancia la protección del medio ambiente. Por tanto, es responsabilidad de los ingenieros proyectistas, investigadores científicos y gestores públicos involucrados, asegurar que los sistemas de tratamiento logren esta meta. Dos aspectos convergentes propugnan para que los ingenieros consideren los procesos naturales como los sistemas de humedales artificiales. El primero es la demanda cada vez mayor de agua en un momento en que las fuentes más económicas ya están agotadas o están cerca de estarlo. El segundo aspecto es el volumen creciente de residuos biológicos y químicos que potencialmente entran en la red de aguas superficiales provenientes de las plantas de tratamiento de agua residual.

Desde este punto de vista y teniendo en cuenta que el costo para construir y operar instalaciones de tratamiento de agua residual con tratamiento avanzado en cuanto a DBO_5 y remoción de nitrógeno, es bastante alto comparado con el costo del tratamiento primero y secundario. La búsqueda de un acercamiento diferente para pulir el efluente, ha renovado el interés en la aplicación al terreno o a humedales artificiales de efluentes de instalaciones convencionales de tratamiento de agua residual. Los sistemas que son más "naturales" en el sentido de que en ellos influyen más las condiciones medioambientales naturales de temperatura, lluvia, luz solar, y

acción del viento son alternativas útiles a los sistemas convencionales, ya que comparados con los sistemas convencionales, los sistemas naturales usan menos energía eléctrica y requieren menos mano de obra para las labores de operación y mantenimiento.

Desde el punto de vista de salud pública y medioambiental, los sistemas naturales tienen potencialmente más puntos de contacto con el ambiente y con el público, debido a la mayor extensión de terreno que involucran.

La supervisión de la calidad del efluente es complicada porque los indicadores de organismos (coliformes totales) no muestran claramente la magnitud de tratamiento del agua residual (por ejemplo remoción de organismos patógenos). Cualquier aplicación futura de agua residual a humedales artificiales debe estar libre de riesgos irrazonables para la salud pública. Puede controlarse el acceso público a estos sistemas cercando, de modo que en lo referente a salud pública, solo sea necesario medir (“monitorear”, palabra que no existe en la lengua española) algunas de las características del efluente y tener un adecuado cuidado con los operarios de las instalaciones.

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales. Éstas son:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del medio de soporte y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los contaminantes disueltos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Los principales contaminantes en el agua residual entran en las siguientes categorías (Anónimo, 2006): Nitrógeno, fósforo, organismos patógenos, metales

pesados, y trazas orgánicas. Los patógenos incluyen bacterias, virus, protozoarios y helmintos. Los metales pesados incluyen cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, selenio, y zinc. Las trazas orgánicas incluyen compuestos sintéticos muy estables (sobre todo hidrocarburos clorados). Las consideraciones en cuanto a salud, se refieren principalmente a nitrógeno, metales, patógenos o trazas orgánicas. Estos contaminantes y los posibles efectos potenciales que causan mayor preocupación se presentan en la Tabla 2.2.

Como ya se mencionó, existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual (Figura 2.3): Sistemas a Flujo Libre (FWS, por sus siglas en inglés) o superficial y Sistemas de Flujo Subsuperficial (SFS, por sus siglas en inglés). En los casos en que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los sistemas FWS suelen consistir en canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por material impermeable o con una barrera subsuperficial, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos (0.1 a 0.6 m).

A los sistemas de flujo superficial normalmente se les aplica agua residual pretratada en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. Los sistemas de flujo libre también se pueden diseñar con el objetivo de crear nuevos hábitats para la fauna y flora o para mejorar las condiciones de humedales naturales próximos.

Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar hábitats de cría para aves acuáticas.

Tabla 2.2. Contaminantes y sus efectos potenciales (Anónimo, 2006)

Contaminante	Efecto potencial
--------------	------------------

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

Nitrógeno Salud Medio ambiente	Suministro de agua a niños pequeños Eutrofización
Fósforo Salud Medio ambiente	No tiene impacto directo Eutrofización Formación de algas que eutrofizan los cuerpos de agua
Patógenos Salud Medio ambiente	Formación de aerosoles en el suministro de agua para cultivos Acumulación en el terreno y contaminación de la vida silvestre (salvaje)
Metales Salud Medio ambiente	Suministro de agua a cultivos y animales en la cadena alimenticia humana A largo plazo daños en el terreno y es tóxico para plantas y animales
Elementos traza orgánicos Salud Medio ambiente	Suministro de agua para plantas y animales en la cadena alimenticia Acumulación en el terreno

Los sistemas de flujo subsuperficial se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavados y rellenos de material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava (Figura 2.4). Las mismas especies vegetales se usan en los dos tipos de humedales artificiales.

El concepto de flujo subsuperficial tiene varias ventajas. Como las reacciones biológicas en ambos tipos de humedales se deben al desarrollo de microorganismos, principalmente, las que proliferan sobre el medio de soporte tendrán mayores tasas de reacción y, por lo tanto, puede tener un área menor. Como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular no está expuesto, se evitan posibles

problemas de mosquitos que pueden llegar a presentarse en sistemas de flujo libre en algunos lugares. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público, ya que no presentan malos olores y, finalmente, para zonas como los altiplanos, donde las madrugadas son muy frías, esta capa presta una mayor protección térmica.

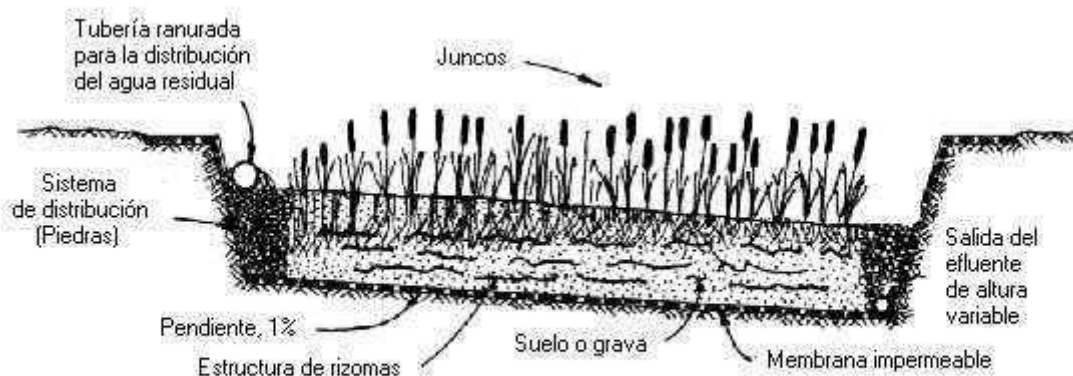


Figura 2.4. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial

Aunque el área requerida sea menor en un sistema de flujo superficial, la viabilidad económica del sistema dependerá del costo de conseguir y poner el material granular en el lecho. Es improbable que un sistema de flujo sub-superficial sea competitivo desde el punto de vista de costos, frente a uno de flujo superficial para pequeñas comunidades y caudales relativamente bajos, pero esto siempre dependerá de los costos del terreno, el tipo de impermeabilización que se requiera y el tipo y disponibilidad del material granular empleado.

En cuanto a la eficiencia depurativa de los humedales, se puede decir que pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO, SS y nitrógeno con eficiencias superiores al 80% (Huanosta-Gutiérrez, 2006; Padrón-López, 2005), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo que es mínima en estos sistemas, aunque hay experiencias a nivel de laboratorio en las que se han obtenido remociones de 90% (Reyes-Luz, 2006).

A continuación se dan algunas experiencias reales sobre la eliminación específica de contaminantes en estos sistemas de flujo superficial y sub-superficial.

Nitrógeno

El nitrógeno está limitado en el agua potable o de beber (en España, “agua de boca”) para proteger la salud de los niños y puede limitarse en aguas superficiales para prevenir eutrofización. Puede eliminarse nitrógeno en estos sistemas mediante procesos de nitrificación/desnitrificación y posterior pérdida del nitrógeno elemental gaseoso a la atmósfera. La remoción de nitrógeno en sistemas de humedales artificiales está entre un 25 y un 85% (Anónimo, 2006).

Fósforo

La remoción de fósforo en los humedales no es muy eficaz debido a las limitadas oportunidades de contacto entre el agua residual y los elementos naturales que promueven la remoción de fósforo. En los humedales artificiales los mecanismos que se reportan en la literatura son la captación por parte de las plantas y la retención por parte del material “inerte” del soporte o empaque (Padrón-López, 2005; Reyes-Luz, 2006).

Patógenos

En lo referente a las aguas superficiales que recibirán la descarga del efluente del humedal artificial, los patógenos de interés en los sistemas de tratamiento acuáticos son bacterias y virus (Tabla 2.3). Generalmente no es una preocupación la contaminación del agua subterránea ni la transmisión a otros lugares vía aerosoles. El agua subterránea no se contaminará en sistemas que estén sellados por una

arcilla impermeable o por una barrera de material sintético que se conoce en México como “geomembrana”.

La investigación se ha dirigido a la transmisión de enfermedades parasitarias a los animales y el hombre por medio de la aplicación al terreno de aguas residuales municipales y lodos de depuradora.

Estudios significativamente completos indican que los parásitos no aumentan en el ganado que ha estado en contacto con pastos regados por agua residual. Los resultados son consistentes en varias regiones del mundo, como Estados Unidos, Polonia y Australia. Estos estudios, aunque no han sido realizados en sistemas de humedales artificiales, indican que el potencial de problemas serios no parece estar presente.

Bacterias

La fauna puede verse afectada por los sistemas de humedales, ya que los lodos anaerobios pueden contener el organismo causante del botulismo (*Clostridium botulinum*). El control de este patógeno puede lograrse, en gran medida, por puntos de dispersión múltiples para el humedal del tipo FWS. Este patógeno no es un problema para las aves silvestres en humedales tipo SFS.

Tabla 2.3. Patógenos en aguas residuales (Anónimo, 2006)

Patógeno	Ejemplos	Efectos típicos
Bacteria	Escherichia coli	Infección de extensión urinaria (UTI), peritonitis, intoxicación por alimentos
	Microbacteria tuberculosis	Tuberculosis
	Salmonella	Intoxicación por alimentos
	Staphylococcus aureus	Síndrome de choque tóxico
	Streptococcus pneumoniae	Infección de garganta
	Helicobacter pylori	Úlceras de estómago
	Francisella tularensis	Tularemia
Virus	Hepatitis A B C D y E	Enfermedad de hígado
	Gripa de virus	Gripa
	Herpes Simple	Herpes
	Molluscum contagiosum	Erupción
	HIV	Sida
Protozoarios	Cryptosporidium	Cryptosporidiosis
	Giardia lamblia	Giardiasis
	Plasmodium	Malaria
	Trypanosoma cruzi	Chagas enfermedad
	Pneumocystis jiroveci	Pulmonía oportunista
Fungi	Pneumocystis jiroveci	Pulmonía oportunista
	Tinea	Tiña
	Candida	Candidiasis
Proteínas	Inpro (<i>Prions</i>)	BSE v CJD

Las principales vías de transmisión de enfermedades a los seres humanos desde el agua residual son: el contacto directo con el agua residual, transporte de aerosoles, cadena alimenticia y tratamiento inadecuado del agua potable (de bebida o de boca).

En un estudio en humedales de flujo libre (FWS) en Listowel, Ontario, Canadá, los coliformes fecales fueron removidos en aproximadamente 90% cuando se operó con un tiempo de residencia de entre 6 y 7 días (Anónimo, 2006). Se han encontrado eficiencias en la remoción de coliformes totales de entre el 93 y el 99% durante el invierno y de 66 a 98% durante el verano con tiempos de residencia hidráulicos de 7.5 días en humedales de flujo libre en Arcata, California (Anónimo, 2006).

Midiendo la proporción de inactivación de bacterias de coliformes en bolsas selladas con incubación *in situ* debajo de la superficie de la arena gruesa de un humedal tipo SFS. El resultado fue que la proporción de inactivación a través del sistema del humedal era dos veces que la de uno sin contacto con la vegetación. La diferencia indica que la mitad de la degradación se debe a la acción que la vegetación efectúa (Anónimo, 2006).

En California, donde la legislación es estricta respecto a los humedales naturales, los humedales artificiales presentan algunas ventajas sobre los naturales, ya que los efluentes finales pueden tratarse con cloro. La desinfección con cloro de efluentes de humedales artificiales puede producir aguas que se pueden reutilizar sin restricción, siempre que los niveles de coliformes totales puedan reducirse a < 2 NMP/100 mL, de la legislación referente a la reutilización de aguas del estado de California o $< 1000/100\text{mL}$ en el 80% de las muestras, como recomendación de la Organización Mundial de la Salud (Anónimo, 2006).

Hay una tendencia creciente de no usar cloro como un desinfectante debido a la formación de **trihalometanos** (THM). La desinfección del efluente del humedal con luz ultravioleta (UV) u ozono puede ser una alternativa ya que no produce THM (Anónimo, 2006). En estos últimos tiempos han surgido nuevas controversias con respecto a la cloración en el agua potable y la formación de trihalometanos (THM), los cuales son compuestos orgánicos que aparecen en el agua potable tras ser

sometida cloración en presencia de sustancias húmicas, potencialmente cancerígenos.

El cloroformo o triclorometano es uno de los trihalometanos que se forman durante la cloración del agua para desinfectarla. Es un líquido incoloro, volátil, de olor característico. Durante mucho tiempo fue utilizado como anestésico, pero se discontinuó a causa de su toxicidad. Actualmente se utiliza como disolvente en la industria química pero, tal como ocurre con todos los compuestos orgánicos halogenados (principalmente flúor y cloro) en sus moléculas, su carácter de sustancias contaminantes hace que se intente restringir su consumo. Se forman pequeñas cantidades de cloroformo cuando el cloro que se usa para la desinfección del agua entra en contacto con las sustancias orgánicas presentes en ésta.

Virus

Los virus en la mayoría de los sistemas del tratamiento son más resistentes a la inactivación que las bacterias. Se probó la eficacia de remoción de un sistema de SFS en Santee, California, con un indicador de contaminación viral (MS-2 bacteriófago) y se informó que se eliminó en un 98.3% en una planta a escala de demostración (800 m²) con un lecho de juncos y un tiempo de residencia hidráulica de 5.5 días. Esto involucró la inoculación en el agua residual influente del virus MS-2 y el estudio de la eficacia de remoción subsecuente. El virus MS-2 se escogió porque es un bacteriófago de ARN casi de igual tamaño que los enterovirus y es más resistente a los rayos UV, el calor y la desinfección, que la mayoría de los virus entéricos (Anónimo, 2006).

Metales

Los metales pesados son contaminantes medioambientales comunes que se producen como resultado de actividades industriales, comerciales y domésticas y, aunque las normas obligan a las industrias que vierten estos productos a alcanzar

niveles de pretratamiento altos, la presencia o no en el agua residual depende de la eficiencia del sistema de control de los vertidos industriales.

Las unidades de proceso convencionales de tratamiento primario y secundario en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son inadecuadas para la remoción eficaz de metales pesados. Los procesos avanzados, incluida la precipitación química, electrólisis, ósmosis inversa e intercambio iónico, se usan para el pretratamiento de fuentes conocidas de metales pesados en aguas residuales industriales. El uso de estos procesos para quitar concentraciones bajas de metales pesados en agua residual municipal tiene la desventaja de un costo de capital alto y unos costos de operación (funcionamiento y mantenimiento) también altos. Las desventajas adicionales pueden ser los costos de energía eléctrica relativamente altos para la electrólisis y la ósmosis inversa y la producción de cantidades grandes de lodos voluminosos con un alto tiempo de decantación en los procesos químicos de precipitación.

Por tanto, un proceso del tratamiento que precipita y retiene metales pesados en el área confinada de un humedal artificial logra el mismo nivel de remoción con menos mano de obra y menores costos de energía. El objetivo del tratamiento para los metales pesados es quitar los metales del medio ambiente y de la cadena alimenticia, sobre todo la cadena alimenticia en ríos y aguas marinas.

El humedal artificial del tipo (SFS) en Santee, California, recibió agua residual municipal que se cargó con cobre, zinc y cadmio. Con un tiempo de residencia hidráulica de 5.5 días, las eficiencias de remoción fueron, respectivamente para cada metal, 99, 97 y 99%. La remoción se atribuyó a los fenómenos de precipitación - adsorción. La precipitación química es reforzada por el metabolismo del humedal, sobre todo de las algas que reducen los niveles de CO₂ disuelto y aumentan el pH (Anónimo, 2006).

Trazas orgánicas

Las aguas residuales municipales e industriales contienen concentraciones variables de compuestos orgánicos sintéticos. Durante 1960-1970, los investigadores medioambientales se dieron cuenta de la tendencia de algunos contaminantes orgánicos a resistirse a ser removidos en el tratamiento convencional del agua residual y persistir en el ambiente por periodos muy largos. Una observación más perturbadora era que esos compuestos tóxicos persistentes, fueron encontrados acumulándose en las cadenas alimenticias debido a la tendencia de los compuestos de ser liposolubles. Un compuesto puede desaparecer de la solución acuosa a través de varios mecanismos. Entre estos están: las alternativas biológicas, químicas, fotoquímicas, y los procesos fisicoquímicos como absorción, sedimentación, y evaporación. La degradación biológica de compuestos orgánicos fácilmente degradables se considera el más importante de éstos (Anónimo, 2006).

Se piensa que la absorción de trazas orgánicas por la materia orgánica y las partículas de arcilla, en caso de encontrarse presentes en el sistema de tratamiento, son los principales mecanismos fisicoquímicos para la remoción de compuestos refractarios en los humedales (Anónimo, 2006).

Se ha visto a través de los años y de los estudios realizados en humedales, que este tipo de sistemas son nobles y durables, ya que si se tienen buenos sistemas de separación primaria y la biomasa generada durante el día se descompone durante la noche pueden operar hasta 25 años sin azolverse.

El enorme inconveniente de estos sistemas es que requieren de áreas superficiales considerables (en países con climas templados son de 2 a 3 m²/persona, lo que implica que, para una familia de cinco personas se requiere de al menos 10 a 15 m² de área de humedal, más el área del sedimentador primario y del reactor de composta para los lodos primarios, donde puede degradarse también la basura de la cocina y la hojarasca de las plantas de ornato), lo que implica que su aplicación solamente es “costeable” en zonas rurales donde el costo del terreno no es un factor importante (Guido-Zárate, 2006). Los usos del agua tratada podrían ser

para el riego y el mantenimiento de las áreas donde tienen a sus animales o, incluso, para los retretes o inodoros, conocidos en México como "WC" o "baños").

Es por eso que, a través de la implementación de esta ecotecnología, se prevé que exista un aumento en la instalación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, como una alternativa más para la depuración del agua residual en esas zonas tan desprotegidas y con problemas sanitarios severos.

Es importante destacar que durante la temporada de lluvias, el agua que entra al sistema influye en la operación, pues incrementa relativamente el flujo volumétrico y reduce el TRH y, por lo tanto, se tiene una lenta estabilización del sistema y una reducción en la eficiencia de remoción.

Actualmente en México se desarrollan programas de investigación en torno a los procedimientos de operación de los sistemas de flujo horizontal subsuperficial y de los de flujo vertical sub-superficial. La UNAM tiene construidos dos de ellos, uno de cada tipo de sistema a nivel prototipo que, obviamente, requieren de programas de mantenimiento.

Durante la investigación realizada en uno de ellos, el de flujo vertical, con una alimentación de agua residual proveniente de las instalaciones sanitarias de la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria de 527 L d^{-1} , se obtuvo un tiempo de residencia hidráulica de 4.1 d. Este flujo se mantuvo durante un periodo de 8 meses, el cual abarcó del 4 de marzo al 24 de noviembre de 2003 (García-Vázquez, 2004). Al evaluar la eficiencia de remoción medida como DQO, se alcanza un 84%, valor que es satisfactorio, pues indica que el sistema está alcanzando eficiencias adecuadas.

Este humedal tiene 15 m^2 de área superficial. Se presenta su hoja de datos técnicos en la Tabla 2.4 (modificada de Fenoglio-Limón, 2000).

Tabla 2.4 Hoja técnica del humedal artificial* (Modificada de Fenoglio-Limón, 2000)

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

Clave	Nombre	Dimensiones	Composición
F-01	Fosa séptica	Vol = 20m ³ Forma: Cilíndrica	Asbesto (Mamparas)
S-02	Sedimentador primario	Largo = 2.32m Ancho = 1.31m Profundidad = 2.13m Forma: Rectangular	Concreto (Mamparas)
L-01	Bomba	Tipo: Electrobomba auto- cebante HP: ½ HP Capacidad=1.34m ³ /h	Acero inoxidable
H-03	Humedal	Largo = 6m Ancho = 2.5m Profundidad = 1.3m Forma: Rectangular (Vol. total incluyendo empaquete y tuberías: 19.5 m ³)	Concreto cubiero con una geomembrana de polipropileno (PPE)

Nota: Siendo una planta experimental a la que se le modifica el TRH su capacidad tratamiento en kgDBO₅ / dia*m³ es variable (se han probado tres tiempos de residencia hidráulica, 5.4, 4.8, 4.1 d y en ellos se tuvieron 74, 80 y 84% de remoción de demanda química de oxígeno, con una concentración inicial promedio de 377±124 mg DQO L⁻¹ (García-Vázquez, 2004).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. VISITAS DE RECONOCIMIENTO

En los días consecutivos a la localización del sistema de tratamiento de agua residual se pudieron realizar las evaluaciones correspondientes para poder determinar el estado en el que se encontraba el HAFVD, generando hojas de datos sobre las operaciones de tipo correctivo y preventivo del sistema. Así mismo se llevaron a cabo las evaluaciones generales dentro y fuera del mismo. Para esto se realizaron visitas semanales, en las que se llenaron listados de requerimientos de mantenimiento de tipo preventivo y de tipo correctivo, para determinar las condiciones en que se encontraba el sistema.

Considerando que una familia de 5 miembros en una zona rural o suburbana genera entre 100 y 150 L de aguas residuales por persona por día, el flujo en estudio del humedal de la UNAM de flujo vertical subsuperficial es equivalente al de esta familia. Esto significa que, con un área de 15 m² y un tiempo de residencia de 4 días es posible eliminar 84% de los contaminantes, generando un efluente tratado que puede usarse para riego de áreas verdes.

En la investigación precedente a ésta (García-Vázquez, 2004), se recomienda no alterar el flujo de alimentación durante la temporada de lluvias debido a que la lluvia arrastra partículas de las superficies expuestas (hollín, polvo y esporas), además de aumentar el flujo. Este tipo de factores deben considerarse para los procesos de depuración, debido a que reducen la eficiencia depurativa. Asimismo, se recomienda un mantenimiento preventivo a la fosa séptica y al sedimentador primario cada 6 meses, para no alterar las concentraciones en los parámetros fisicoquímicos del agua residual que entra al humedal (Durán-de-Bazúa y col., 2003).

Es también importante realizar la poda de los carrizos cuando menos una vez al año o incluso una vez por semestre, para que no obstruyan la tubería de alimentación y evitar una sobrepoblación que impida la adecuada operación del HAFV. Además, esta biomasa obtenida de la conversión de la materia orgánica contaminante del agua puede usarse en la construcción, jarcería y lo que ya no pueda aprovecharse, como material para “composta” en combinación con los lodos que se eliminan en el sedimentador primario mencionado anteriormente (Gaitán-Zamora, 2007).

Una de las cuestiones importantes de cualquier sistema es el mantenimiento. Como el sistema se encuentra ubicado en un sitio donde tiene acceso el personal de Conservación de Áreas Verdes de la UNAM y, en ocasiones, tiran basura en el humedal, es importante evitar que se deposite basura dentro del humedal, ya que aumenta la carga orgánica y obstruye el flujo hidráulico.

Asimismo, como se ha planteado evaluar un cuarto flujo de alimentación, probablemente con un tiempo de residencia de 2.5 a 3 días para alcanzar una mayor eficiencia de depuración, se debe preparar el sistema para estos nuevos experimentos.

Por ello, esta investigación se refiere a la realización de un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de este humedal artificial para que se inicie esta cuarta etapa de actividades.

En la Figura 3.1 se presenta un diagrama de bloques de la metodología seguida.

Revisión bibliográfica para recopilación
de información sobre construcción y
operación del HAFVD

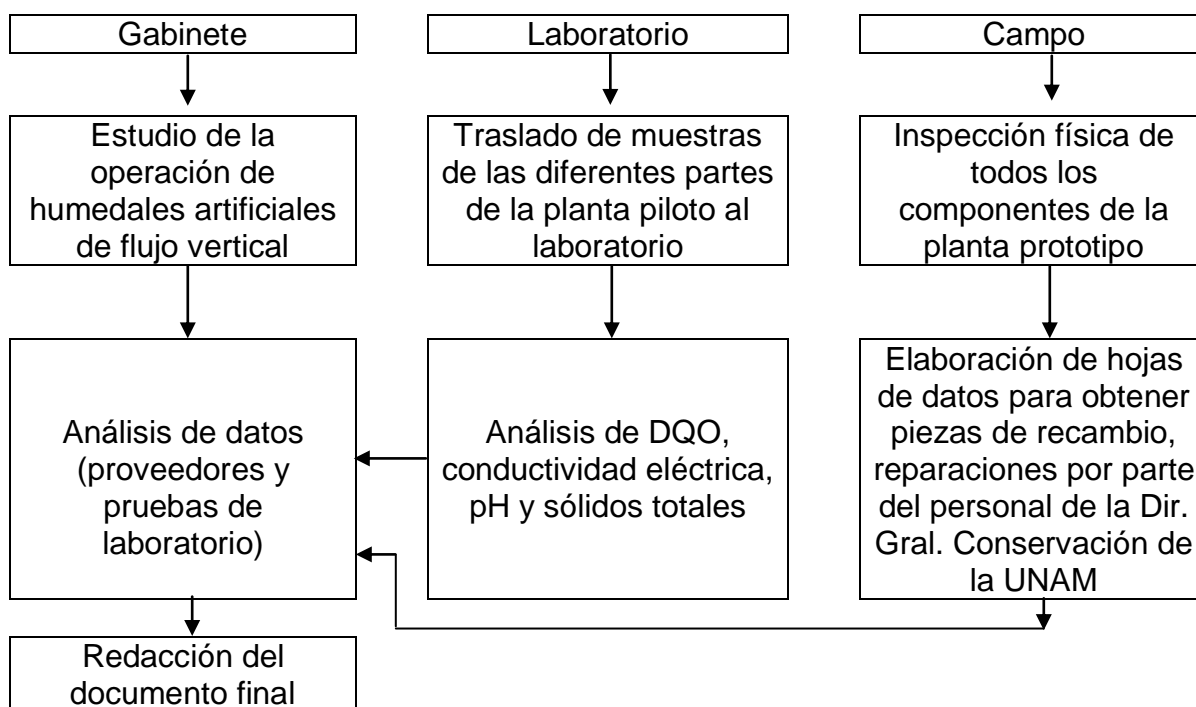


Figura 3.1. Diagrama de bloques de la metodología seguida en esta investigación

3.2. VISITAS DE REALIZACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

Una vez que se detectaron los problemas de mantenimiento preventivo y correctivo, se realizaron visitas programando las tareas de reparación. Asimismo, se plantearon en los formatos de programación de las tareas las entidades internas (UNAM) y externas (proveedores) que podrían soportar o apoyar esas tareas. Dentro de las entidades internas se solicitaron los apoyos a las autoridades encargadas del mantenimiento correctivo y preventivo de sistemas universitarios, que están representadas por la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC). Dentro de las entidades externas se realizaron búsquedas a través de la Sección Amarilla y de las redes internacionales ("Internet"), para obtener cotizaciones.

3.3. REALIZACIÓN DE LAS TAREAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS

Siguiendo las metodologías propuestas en los dos incisos anteriores, se llevaron a cabo las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo.

Se hicieron pruebas físicas y químicas de las aguas residuales que llegan al sistema con objeto de determinar su calidad a la entrada y a la salida para ver el funcionamiento integral del sistema (operación de cada una de las etapas del proceso).

Se midieron en esas aguas residuales demanda química de oxígeno, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales.

3.4. MÉTODOS ANALÍTICOS DE SEGUIMIENTO DEL SISTEMA

Dentro de los métodos analíticos empleados para evaluar el desempeño del sistema están los siguientes:

DQO

DQO (Demanda química de oxígeno): Cantidad de “oxígeno” (medido en mg/L) que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable, bajo condiciones de prueba específicas. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. En contraposición a la DBO, con la DQO prácticamente todos los compuestos son oxidados. A la relación DBO/DQO se le conoce como relación de biodegradabilidad (si es igual a uno se considera que los contaminantes son totalmente biodegradables y si es igual a cero se considera que son totalmente recalcitrantes o tóxicos). En el Anexo 3 se presenta la metodología.

Valores de pH

Para determinar el pH de las muestras tomadas en el influente y efluente del humedal artificial en estudio se siguió la metodología descrita en el Anexo 3.

Conductividad eléctrica

Se midió la conductividad eléctrica de influente y efluente del humedal en estudio. En el Anexo 3, se presenta la metodología.

La calibración del equipo de campo se hace cada 2 semanas. Se realiza empleando soluciones patrón de acuerdo con el instructivo del fabricante.

3.5 ENTREGA DEL SISTEMA LISTO PARA OPERACIÓN

Para hacer entrega del sistema operando y del manual actualizado de operación y mantenimiento, se consideraron algunas de las investigaciones previas y el diseño de un manual ya existente (Durán-de-Bazúa y col., 2003; Fenoglio-Limón, 2000; García-Vázquez, 2005; Rodríguez-Cruz y Varela-Montellano, 2003) para que, en este trabajo se incluyeran solamente las tareas para este humedal en particular en las condiciones en las que se encontraba.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. VISITAS DE RECONOCIMIENTO. MEDIDAS DE REMEDIACIÓN

La Figura 4.1 muestra el sitio de localización del humedal artificial en estudio y la Figura 4.2 presenta un diagrama esquemático realizado cuando este sistema fue construido y arrancado (Esponda-Aguilar, 2001; Fenoglio-Limón, 2000). El sistema se alimenta con aguas residuales generadas en las instalaciones sanitarias del edificio del Taller de Conservación de la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM.



Figura 4.1. Zona Cultural de la 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)

Son conducidas por un tren de tratamiento consistente en una fosa séptica, un tanque sedimentador primario y de allí llegan a un humedal artificial de flujo

vertical descendente construido en el marco de este proyecto de investigación. En el diagrama de flujo de proceso de la Figura 4.2 puede verificarse la disposición de los equipos. En su momento, se diseñó y ejecutó un plan monitorio de las variables fisicoquímicas (que, para esta investigación son DQO, pH y conductividad eléctrica) para evaluar el desempeño del sistema. Las pruebas fisicoquímicas se extendieron durante cinco meses, con una frecuencia promedio de dos veces por semana. En la Figura 4.3 puede observarse la secuencia de actividades realizadas durante la estabilización del sistema prototipo (Esponda-Aguilar, 2001; Fenoglio-Limón, 2000).

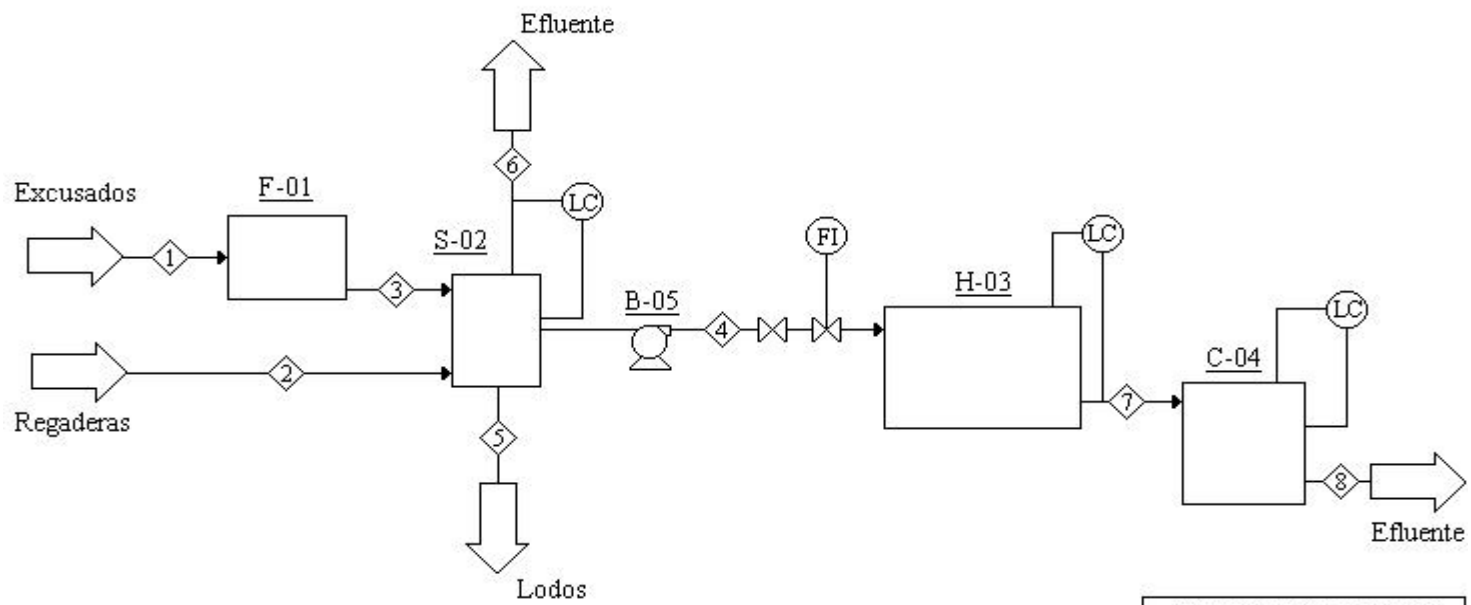
En las visitas de reconocimiento llevadas a cabo, se pudieron realizar las evaluaciones correspondientes para determinar el estado en el que se encontraba el HAFVD, llenando las hojas de datos sobre las operaciones de tipo correctivo y preventivo del sistema. Así mismo, se llevaron a cabo las evaluaciones generales dentro y fuera del mismo. A continuación, se presentan los resultados de las visitas semanales, en las que se llenaron listados de requerimientos de mantenimiento de tipo preventivo y de tipo correctivo, para determinar las condiciones en que se encontraba el sistema y corregirlas cuando era necesario (Tablas 4.1 a 4.3). La Tabla 4.2 presenta el cronograma de actividades desarrollado en esta investigación.

En las visitas de reconocimiento llevadas a cabo, se pudieron realizar las evaluaciones correspondientes para determinar el estado en el que se encontraba el HAFVD, llenando las hojas de datos sobre las operaciones de tipo correctivo y preventivo del sistema. Así mismo, se llevaron a cabo las evaluaciones generales dentro y fuera del mismo. A continuación, se presentan los resultados de las visitas semanales, en las que se llenaron listados de requerimientos de mantenimiento de tipo preventivo y de tipo correctivo, para determinar las condiciones en que se encontraba el sistema y corregirlas cuando era necesario (Tablas 4.1 a 4.3). La Tabla 4.2 presenta el cronograma de actividades desarrollado en esta investigación.

Tabla 4.1. Listado de los equipos que requiere de mantenimiento preventivo		
Clave	Nombre	Servicio
F-01	Fosa séptica	Genera biomasa anaerobia y gases (CO ₂ y CH ₄ , principalmente) obtenidos por la conversión de la materia orgánica e inorgánica disuelta y en suspensión) dentro del tanque
S-02	Sedimentador primario	Retiene la biomasa anaerobia y aerobia generada e incrementa la estancia de la materia en suspensión para una estabilización de sólidos sedimentables
LC	Temporizador ("timer")	Regulador de las descargas de agua residual a suministrar en el humedal desde el sedimentador primario
L-01	Moto-Bomba	Impulsa el agua clarificada (conteniendo materia orgánica e inorgánica soluble), llevándola hasta el HAFV
H-03	Humedal	Transforma la materia biodegradable
C-04	Cisterna de agua tratada	Captación del efluente tratado en el HAFV

4.2. EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA A ESCALA PROTOTIPO DE LA ZONA CULTURAL DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA

La función de la planta piloto es servir como un sistema para estudiar la adaptación de la tecnología de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales a las condiciones climáticas y geográficas del Valle de México en su zona sur. La ubicación de la planta experimental fue elegida de acuerdo con las características requeridas para un equipo prototipo, pues está expuesto a condiciones de campo y los datos obtenidos de su operación son significativos, pero tiene un tamaño suficientemente pequeño como para ser operado y evaluado con facilidad. De las Tablas 4.1 a 4.3 puede observarse que hay puntos cruciales para la operación eficiente del sistema. A continuación se describen por orden de importancia.



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

Figura 4.2. Humedal artificial de flujo vertical (Tomado de Fenoglio-Limón, 2000)

Tabla 4.2. Cronograma de actividades

actividades Oct. 2005-Julio 2006											
		Oct-05	Nov-05	Dic-05	Ene-06	Feb-06	Mar-06	Abr-06	May-06	Jun-06	Jul-06
	Resolución de daños	■	■	■			■	■	■		
AR*	Arranque de la bomba										
	Control de la válvula	■	■	■	■				■	■	■
	Estabilización de bomba			■	■			■	■		
HAFV*	Evaluación del HAFV										
	Estabilización del HAFV			■	■	■	■	■	■	■	■
	Análisis de muestras										
	Pruebas de campo (pH, conductividad eléctrica)					■	■	■	■	■	■
	Ajuste de flujo de alimentación					■	■	■	■	■	■
ETR*	Pruebas de DQO y SST					■	■	■	■	■	■
	Mantenimiento sedimentador primario y bomba de alimentación			■			■			■	

EVG	Evaluación general	EVS	Evaluación del sedimentador	HAFV	Evaluación del HAFV
FS	Fosa séptica	AR	Arranque de bombas	ETR	Estabilización del reactor

Tabla 4.3. Acciones preventivas y correctivas

Clave	Nombre	Condiciones iniciales	Problema real	Acción preventiva	Acción correctiva	Condiciones finales	Resultados
F-01	Fosa séptica	Se pudo observar que la tapa de la fosa séptica se encontraba en mal estado. La degradación de grasa y aceites y de materia orgánica es deficiente	La falta de desazolve periódico hace que se incremente el contenido de materia orgánica e en este sistema	Desazolver periódicamente	Se reemplazó la tapa por una de mejor material y más estable y se solicitó a las autoridades respectivas su desazolve	Sello hermético del sistema de desazolve y operación adecuada de separación sólido-líquido-gas	Muestras confiables a analizar
S-02	Sedimentador primario	Se cuenta con un control de nivel (flotador) en el Tanque S-1 para evitar que la bomba funcione cuando no haya volumen suficiente de aguas residuales	Este controlador de nivel se encuentra dañado por restos de materia orgánica acumulados en este tiempo en que no se desazolvó la fosa séptica	Se paró totalmente el sistema y se realizaron trabajos de limpieza en el tanque y en el flotador	Se fijó nuevamente el control de nivel en la parte superior del sedimentador	Se reestableció el sistema a condiciones intermitentes ya que el temporizador no funciona	Alimentación intermitente manual
LC	Temporizador ("timer")	Descompuesto	Debido a la falta de mantenimiento preventivo y correctivo no funcionaba	Realizar los mantenimientos de los sistemas de separación primaria	Se buscó su reemplazo pero no ha llegado la pieza	Sigue pendiente	Ninguno
L-01	Moto-Bomba	Se encuentra funcionando sin fugas aparentemente existentes	A lo largo de la operación hubo una fuga en el niple de la bomba	Se cerraron todos los sistemas para evitar una posible avería del sistema debida a la fuga de agua en la bomba	Se cambió el niple colocando material aislante ("silicón") en las juntas y se reinició el sistema	Trabaja actualmente de manera intermitente	Un flujo controlado manualmente realiza la alimentación al sistema
H-03	Humedal	Se pudo constatar que las tuberías de la superficie del humedal se encuentran en perfecto estado	Ninguno	Se limpiaron las tuberías de distribución en la primera poda de las hidrofitas	Ninguna	Alimentación adecuada	Operación adecuada
C-04	Cisterna de agua tratada	La tapa metálica se encontró en mal estado y el sistema para mantener el nivel de inundación (manguera de hule) está atrofiado	La lluvia ácida crea problemas de corrosión por lo que permite la entrada de basura y arrastres de la plancha de composta	Debe limpiarse periódicamente y pintarse cada seis meses para evitar su corrosión	Se limpiaron la tapa y la tubería que forma el sistema de sifón para permitir la descarga adecuada del agua tratada al exterior	Flujo de salida adecuado (ligeramente menor al de entrada por la evapotranspiración)	Operación adecuada

- a) Mantenimiento del sedimentador primario I (Fosa séptica).
- b) Mantenimiento y reparación del sedimentador primario II (Sedimentador primario).
- c) Mantenimiento y reparación del reactor (humedal artificial de flujo vertical).

(a-1) MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO I (FOSA SÉPTICA)

Dentro de las actividades preventivas en este segmento del sistema, se constató que las actividades realizadas y llevadas a cabo fueron de índole preventivo; esto, es se realizaron de acuerdo con sus necesidades básicas. Éstas consistieron en los trabajos de evaluación del sistema, por lo que se revisaron todos los posibles inconvenientes que pudieran alterar los resultados de las investigaciones que lleven a cabo en el sistema.

Los estudios arrojan como resultado que es necesario realizar los trabajos de desazolve al menos cada seis meses, ya que de caso contrario, los sólidos empiezan a pasar al segundo sedimentador (sedimentador primario). Estas labores las realiza la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC), quienes cuentan con un vehículo popularmente conocido como “vector” el cual succiona el lodo y lo coloca en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad Universitaria para que sea estabilizado.

Es importante mencionar que es necesario también el mantenimiento a las tuberías de alimentación del sedimentador primario I, así como la implementación de tareas de mantenimiento del dispositivo de recubrimiento de la superficie (tapa). Ésta fue cambiada por el mismo personal de la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC).

(a-2) MANTENIMIENTO CORRECTIVO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO I (FOSA)

Éstas consistieron en el desazolve del sedimentador primario I. La bitácora del equipo indicaba que la última tarea de este tipo se había realizado hacía 24 meses y seis días. Lógicamente, por la falta de atención de esta función, el sedimentador primario II (conocido como tal), no era suficiente para eliminar los sólidos en suspensión, lo que probablemente provocó los daños encontrados en el flotador de ese sistema.

La necesidad de ilustrar estas medidas preventivas y correctivas, es para tener un mejoramiento en lo referente a las actividades realizadas por esta unidad (retener el material en suspensión, más ligero y más pesado que el agua), para establecer de manera permanente una buena separación que permita una vida útil mayor del humedal artificial en el futuro.

(b-1) MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO II (SEDIMENTADOR PRIMARIO)

Las actividades de tipo preventivo se enfocaron a revisar y dar servicio a todos los equipos del sistema, incluyendo dispositivos de control de nivel y sistema de alimentación intermitente automática, para un buen desempeño y funcionamiento. Estos se llevaron a cabo en la parte denominada cuarto eléctrico de máquinas. En éste se encuentran una bomba de ½ HP, y sus controladores análogos y el temporizador que controla su operación. Se debe verificar el toma-corriente de ambos equipos y su voltaje, así como el manejo adecuado para la operación del flotador, que es el que controla el nivel óptimo de agua residual. Este regulador del flujo de agua residual proveniente de la fosa séptica (SEDIMENTADOR PRIMARIO I), se encuentra ubicado en la parte interior del sedimentador primario II (sedimentador primario). El sistema cuenta con tubería de 3.81 cm (1½”), por la que se recibe el agua residual de la fosa séptica y con tubería de 3.81 cm (1½”), con la cual se alimenta el reactor (humedal artificial de flujo vertical).

**(b-2) MANTENIMIENTO CORRECTIVO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO II
(SEDIMENTADOR PRIMARIO)**

Estas actividades consistieron en corregir un segmento que altera las condiciones normales de operación, por lo que fue necesario realizar los trabajos de purificación del sedimentador secundario, debido a que el sistema permaneció por un tiempo fuera de servicio, acumulándose un exceso de materia orgánica, que pudiera alterar los resultados de los experimentos que se vayan a efectuar y sus respectivos análisis.

También se llevaron a cabo las reparaciones correspondientes a la tubería de 3.81 cm de diámetro (1½”), ya que existían algunas fracturas a lo largo de algunos tramos de tubería, así como la existencia de algunos taponamientos internos, por falta de mantenimiento y de uso continuo.

(c-1) MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL REACTOR (HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL DESCENDENTE)

Las actividades de tipo preventivo realizadas en estos segmentos incluyen la poda y control de crecimiento de las macrofitas originalmente sembradas en el sistema (carrizos, tules y zacaltules), así como el buen funcionamiento de las tuberías de alimentación al HAFVD. Asimismo, se buscaron algunas posibles fisuras que se pudieran presentar en la geomembrana y en las tuberías de salida, donde se realiza de manera continua la captación del efluente tratado.

(c-2) MANTENIMIENTO CORRECTIVO DEL REACTOR (HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL DESCENDENTE)

Las actividades realizadas de manera correctiva fueron la poda de los tules, zacaltules y carrizos hasta obtener la altura recomendada de 0.5m de altura

(Esponda-Aguilar, 2001). Asimismo, se realizaron los trabajos de mantenimiento general. Dado que el HAFVD permaneció algún tiempo fuera de servicio, hubo una acumulación excesiva de materia orgánica por lo que, para garantizar su buen funcionamiento (eficiente y eficaz), se debe dar mantenimiento a las tuberías mediante la limpieza interior de las mismas, incluyendo la cisterna y sus aditamentos.

Las actividades de tipo correctivo que se realizaron en este segmento fue la de evaluar de una manera muy general el estado en que se encontraba esta parte del sistema. Lo primero fue identificar las correcciones que anteriormente se realizaron e, inmediatamente después de esto, planear y realizar los trabajos de mantenimiento general.

4.3. ESTADO DE LOS SISTEMAS DE SEDIMENTACIÓN PRIMARIA (FOSA SÉPTICA Y SEDIMENTADOR PRIMARIO)

Con la revisión de los documentos generados durante el uso del sistema (tesis desde 1999, cuando se arrancó el sistema, consideradas como las bitácoras), se detectaron los puntos principales para esta labor.

Se pudo constatar que el estado que se encontraba, en primer lugar, el sistema de sedimentación primaria I (fosa séptica), era de una condición poco satisfactoria. Los recubrimientos de la fosa, especialmente la parte superior y, específicamente, la tapa, estaban en muy malas condiciones.

Las medidas correctivas que se tomaron consistieron en el cambio de la tapa, remplazándola por un material más impermeable y menos reactivo con los gases que se generan a su interior. Este cambio debe ser realizado por el personal responsable por parte de la UNAM de estas tareas ya que la Facultad de Química oficialmente no tiene ingerencia en esta operación. Para llevar a cabo estas tareas se hizo el contacto con el personal responsable y, a través de intercambio epistolar y telefónico se logró la sustitución de la tapa.

En segundo lugar, se revisaron de manera minuciosa las condiciones iniciales de la tubería de alimentación y se constató que en éstas no había problemas y que el flujo de alimentación tanto a este equipo desde las instalaciones sanitarias, como de éste al sedimentador secundario estaban en buenas condiciones.

Al realizar la revisión de las bitácoras se constató que era necesario realizar la limpieza de los sedimentos acumulados en la fosa séptica. La acción correctiva consistente en los trabajos de remoción con un equipo (VACTOR) para desazolvar el contenido de materia orgánica acumulada, proveniente de los sistemas sanitarios de las oficinas a las que sirve este sistema, se solicitó oficialmente a la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC), también de manera epistolar y telefónica.

La necesidad de ilustrar estas medidas preventivas y correctivas, es para tener un nivel ascendente de las secuencias realizadas y sus posibles mejoramientos en lo referente a las actividades realizadas, para establecer de manera permanente un buen uso de métodos y análisis de los procedimientos a seguir en un futuro.

Respecto del sedimentador primario II, las actividades consistieron en corregir los problemas que alteraban las condiciones normales de operación. La primera de ellas era que, como la fosa séptica estaba totalmente azolvada, parte de los sólidos en suspensión se pasaron a este pequeño sedimentador (ver el acervo fotográfico en el Anexo 1, Figura A.1). Por ello, fue necesario realizar en este sistema también trabajos de limpieza para eliminar el exceso de materia orgánica, que evidentemente puede alterar los resultados de los experimentos que se efectúen y sus respectivos análisis. Estas tareas también fueron realizadas por el personal de la UNAM, responsable de ellas.

Las actividades de tipo preventivo se enfocaron también a revisar y dar servicio a todos los equipos del sistema, incluyendo dispositivos de control para un buen desempeño y funcionamiento. Estos se llevaron a cabo en la parte denominada cuarto eléctrico de máquinas. Esto incluye específicamente la revisión del funcionamiento del equipo de alimentación automatizada de agua residual al reactor, consistente en una bomba de ½ HP y sus controladores análogos. Se verificaron el toma-corriente de ésta y su voltaje y el manejo adecuado para la operación del flotador, permitiendo que regule el flujo de agua de manera óptima, ya que estos equipos se encuentran ubicados en la parte interior del sedimentador primario II.

Como se mencionó en el Capítulo 2 sobre la alimentación intermitente de este tipo de sistemas, desde que se construyó se instaló un “temporizador” (relay) para operar en forma automatizada la bomba de alimentación de agua residual del sedimentador primario II al reactor. Como ya se dijo, esto debía hacerse cada cuatro horas, durante un tiempo dado que garantizara un tiempo de residencia hidráulica en el reactor predefinido para los experimentos que desearan realizar los investigadores.

Sin embargo, este sistema estaba descompuesto y el reactor no era alimentado adecuadamente. A continuación se da una relación prolija de la forma en que se abordó esta problemática.

4.3.1 ESTADO DEL TEMPORIZADOR

Para hacer los trabajos correctivos del temporizador, se verificó primero su funcionamiento, con objeto de buscar la forma de repararlo, ya que el equipo original fue donado por el Gobierno de la RFA en el marco de un proyecto de cooperación entre la UNAM y la GTZ (Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica, por sus siglas en alemán). El equipo fue removido para su reparación por parte del personal del taller electrónico de la DGOyC. Sin embargo, no pudieron repararlo.

Se realizó una búsqueda tanto en páginas de las redes internacionales (“internet”), como en la sección amarilla, llegando a la conclusión de que existen varios modelos relativamente parecidos al original que se tenía para realizar estas funciones. Al realizarse esta investigación se encontró que existen sistemas actualmente más sofisticados, que realizarían el trabajo de una manera más práctica y eficiente. Por tal motivo se pidió la colaboración de las autoridades de la DGOyC para su sustitución. El problema que existe actualmente es, so solamente el costo del equipo, sino el de la adecuación del área donde se encontraba el equipo original (que era el mismo sedimentador primario II), lo que significaba construir un nuevo cuarto para la instalación de este aparato, para que quedara fuera del alcance de una posible fuga de agua residual que alterara el aparato y que lo protegiera del vandalismo o de la intemperie. Esto requiere de autorizaciones por parte de las autoridades universitarias correspondientes por lo que no ha procedido ni su adquisición ni la construcción del nuevo sitio de instalación.

Consecuentemente, la alimentación se realiza en forma manual, en vez de seis veces cada 24 horas solamente dos veces (cada 12 horas), con objeto de mantener el reactor operando en forma estable.

4.3.2 ESTADO DE LA TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN AL HUMEDAL

A diferencia de las tuberías de suministro del agua residual a la fosa séptica y de ésta al sedimentador primario II, las tuberías de alimentación al humedal artificial sí tenían problemas. Existían varias fracturas a lo largo de algunos tramos de tubería, como la existencia de algunos taponamientos internos de la misma, por falta de mantenimiento y por el exceso de materia orgánica en el agua residual.

Es importante recordar que el humedal se encuentra ubicado junto a la plancha de composta con una diferencia de alturas entre el sedimentador primario II y la plancha de 47 m (ésta es la razón por la que es necesario bombear el agua residual clarificada). En la Figura 6 se puede apreciar este problema técnico y que las tuberías se encuentran a la intemperie.

Por ello, también se realizó la actividad correctiva de cambio de todos los segmentos dañados que comprende la longitud completa de la tubería de 3.81 cm de diámetro que alimenta al reactor (humedal artificial de flujo vertical descendente) y que lleva el agua residual clarificada hasta la parte superior del reactor para su alimentación intermitente.

La tubería de alimentación del HAFVD tiene el problema de que cada vez que se realizan las labores de poda de las hidrofitas, si el personal no las realiza con cuidado, rompe los segmentos ya que estos se encuentran prácticamente en la superficie (y el empaque al ser pisado las fractura).

Esto implica que cada vez que se realizan labores de poda debe verificarse el estado en que quedó el sistema de alimentación (incluyendo codos, tes y tubo recto), reparándolos de inmediato. Asimismo, esta labor es muy importante ya que la biomasa microbiana que se va formando en su interior conforme el agua residual fluye por ellos, tiende a tapar los orificios de alimentación por lo que es necesario al

llevar a cabo estas reparaciones darles a las partes que no están dañadas una limpieza profunda para eliminar la biomasa ocluída en ellas.

Una reparación de suma importancia, es la que se presentó en la salida de la bomba hacia el HAFVD, en esta ocasión se presentó una fuga de agua en el niple de unión, por lo que se tuvo que realizar de manera urgente la reparación de la misma. Este problema es importante ya que si la fuga no se repara de manera inmediata puede deteriorar las partes eléctricas y mecánicas de moto-bomba de alimentación y los sistemas de control, por lo que las actividades correctivas no deben hacerse esperar y prever que no se den estas fugas verificando el estado que guardan los accesorios.

Como puede observarse, los siguientes componentes requirieron de la mayor atención:



- Mantenimiento y reparación del sedimentador primario I (Fosa séptica).
- Mantenimiento y reparación del sedimentador primario II (Conocido como sedimentador).
- Mantenimiento y reparación de los equipos servomotores y las tuberías y accesorios.

4.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO AL REACTOR (HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL DESCENDENTE)

Las actividades de tipo preventivo que deben realizarse a este punto vital del sistema es la poda de las hidrofitas, ya que su crecimiento es directamente proporcional a la materia orgánica que acompaña al agua residual y a la insolación que reciben. Se han hecho estimado de su crecimiento, que es de 1 m cada dos meses (Gaitán-Zamora, 2006; García-Arreola, 2006), por lo que es necesario

realizar su poda en la primavera y el otoño. Como se mencionaba en el punto anterior, debe cuidarse que después de las labores de poda se revisen las tuberías de alimentación para reparar todos los daños causados durante estas tareas.

Asimismo, aunque las geomembranas están garantizadas por los proveedores por 25 años (ya que se usan para los rellenos sanitarios, donde mediante maquinaria pesada redistribuyen la basura y la recubren con suelo), es importante revisar las “juntas” para verificar que no haya posibles fisuras que pudieran provocar que el influente o efluente contaminen el subsuelo (Figuras 4.4 y 5).

	
<p>Figura 4.3. Paredes de concreto del HAFVD</p>	<p>Figura 4.4. Recubrimiento de PPE en las paredes del HAFVD</p>

4.5 CONSIDERACIONES FINALES

En el Anexo 1 se presentan las fotografías de las partes importantes de accesorios que deben ser vigiladas para su correcta operación y, sobre todo, mantenimiento preventivo y correctivo.

En el Anexo 2 se presentan los datos experimentales de demanda química de oxígeno, pH, conductividad eléctrica y temperatura que se tomaron a lo largo de un

lapso de seis meses con objeto de verificar la variabilidad del sistema ocasionada por la falta de mantenimiento preventivo y correctivo.

Se espera que ahora que el sistema ya está operando adecuadamente (con excepción del temporizador que no ha sido todavía entregado por el Departamento de Compras de la Facultad de Química de la UNAM, que obliga a alimentar en forma manual), estas características de operación vuelvan a estabilizarse.

Deben tenerse en cuenta los puntos a seguir en la mejora continua de este sistema de tratamiento de agua residual. Los puntos se enumeran continuación:

1. El mantenimiento mayor del humedal y sus accesorios debe realizarse durante dos periodos por año, considerando los mantenimientos en todos los aspectos posibles para su mejora.
2. Todas las labores que se realicen deben quedar consignadas en el cuaderno “de bitácora” correspondiente al mantenimiento para facilitar el buen funcionamiento del humedal.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con el objetivo principal de esta investigación, que era el de rehabilitar un sistema de humedales artificiales de flujo vertical a escala prototipo para el tratamiento de aguas residuales dejándolo listo para ser operado nuevamente con un tiempo de residencia hidráulico específico de 3 días, se puede concluir lo siguiente:

- Se revisaron los sistemas de tuberías para reparar aquéllas que se encontraron dañadas. Para mantener el sistema por tiempo indefinido se recomienda que se realice por lo menos una revisión exhaustiva de cada 15 días para el buen funcionamiento del humedal y sus componentes de tubería.
- Se revisó el sedimentador primario I (fosa séptica que sirve como colector de las aguas residuales de las oficinas de una pequeña fracción de la Zona Cultural) para evitar que se arrastren sólidos suspendidos al sedimentador primario II y de éste al humedal. Se recomienda que los trabajos de desazolve se lleven a cabo cada seis meses (dos veces al año), para que no exista una acumulación de materia orgánica dentro del sistema.
- Se revisó el sedimentador primario II y se pudo notar que existía una acumulación de material orgánico arrastrado de la fosa séptica, que no permitía un adecuado funcionamiento del sistema. Se recomienda realizar inspecciones mensuales para verificar detalladamente la operación del sedimentador primario II, para que el agua residual que reciba el humedal no contenga material en suspensión que azolve el material de empaque del reactor.

- Se revisó el sistema de alimentación automatizada, que empleaba un temporizador para alimentar en forma discontinua cada cuatro horas. Dado que el sistema ya no funcionaba y no se pudo reparar el temporizador, se optó por solicitar su reemplazo y, temporalmente, el humedal está operando en forma manual con un gasto de alimentación diario equivalente al tiempo de residencia hidráulico de 3 días. Cuando el temporizador de reemplazo sea colocado esta alimentación manual ya no será necesaria.

Las recomendaciones a la luz de las tareas realizadas en esta investigación son las siguientes:

1. En esta investigación de tipo teórico-experimental se detectaron algunos problemas de tipo operativo. Estos se debieron a fallas de tipo preventivo y correctivo, que existían en la operación del sistema, así como a la necesidad de realizar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo de cada uno de los accesorios que componen al sistema.
2. Uno de los principales problemas es la acumulación de materia orgánica dentro de los sedimentadores primario I (fosa séptica) y el sedimentador primario II (tanque homogeneizador), por lo que es importante que la bitácora de mantenimiento se revise cada mes para solicitar a tiempo la limpieza de la fosa séptica con el personal de la UNAM responsable de esa operación.

El Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, entidad responsable de estas instalaciones, está en proceso de firmar un acuerdo interno de cooperación académica con el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, CCH Sur, con objeto de que se utilice con fines de docencia, además de sus funciones de investigación y de demostración de la bondad de esta ecotecnología. Esto permitirá que los profesores del CCH Sur de las asignaturas de Biología y Química apoyen a la Facultad de Química en las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo en compañía de sus estudiantes

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

motivándolos a conocer sistemas de tratamiento de aguas residuales amigables con el ambiente (Arreguín-Rojas y Durán-de-Bazúa, 2007).

ANEXO 1

ACERVO FOTOGRÁFICO

**ESTADO INICIAL DE LOS EQUIPOS DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO
VERTICAL DESCENDENTE, HAFVD**



Figura A-1. Sedimentador primario del HAFVD (fosa séptica)



Figura A-2. Tubería de alimentación al HAFVD (fosa séptica)



Figura A-3. Tanque homogenizador o sedimentador primario II



Figura A-4. Tapa del homogenizador o sedimentador primario II



Figura A-5. Válvula de alimentación al HAFVD



Figura A-6. Bomba de alimentación al HAFVD



Figura A-7. Válvula de alimentación de alimentación al HAFVD



Figura A-8. HAFVD a un lado del taller de composta



Figura A-9. HAFVD



Figura A-10. Acercamiento al HAFVD para ver la geomembrana



Figura A-11. Fotografía de extracción de carrizos para experimentos en el sistemas de HAFVD a escala de laboratorio



Figura A-12. Trabajos de poda del HAFVD por personal de la UNAM

ANEXO 2

DATOS EXPERIMENTALES

TABLA A-1
CONDUCTIVIDAD

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
06-Feb-06	2440	860	804
08-Feb-06	2520	945	1952
10-Feb-06	2550	1050	1714
13-Feb-06	2555	981	1129
15-Feb-06	2420	882	1182
17-Feb-06	2440	1046	1115
20-Feb-06	3000	892	1112
22-Feb-06	2580	1094	1193
24-Feb-06	2760	1096	1098
27-Feb-06	2800	991	1116

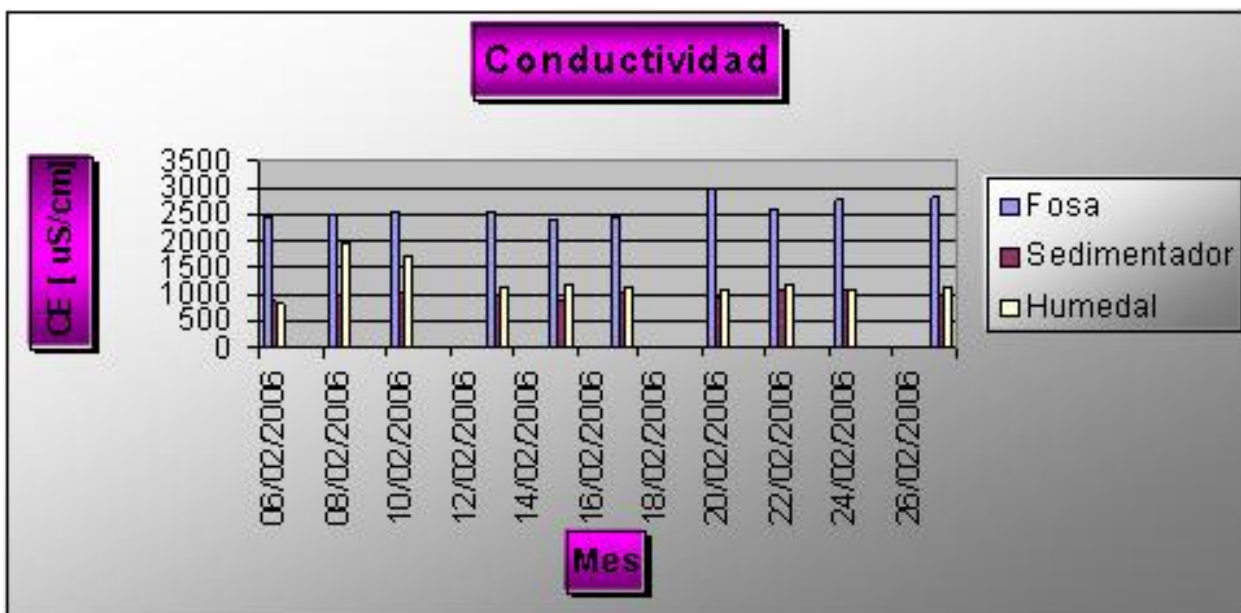


TABLA A-2
SÓLIDOS TOTALES

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
06-Feb-06	1414	498	467
08-Feb-06	1435	945	1138
10-Feb-06	1460	611	997
13-Feb-06	1494	570	655
15-Feb-06	1403	509	686
17-Feb-06	1417	604	647
20-Feb-06	1729	514	646
22-Feb-06	1481	634	692
24-Feb-06	1599	633	639
27-Feb-06	1620	575	648

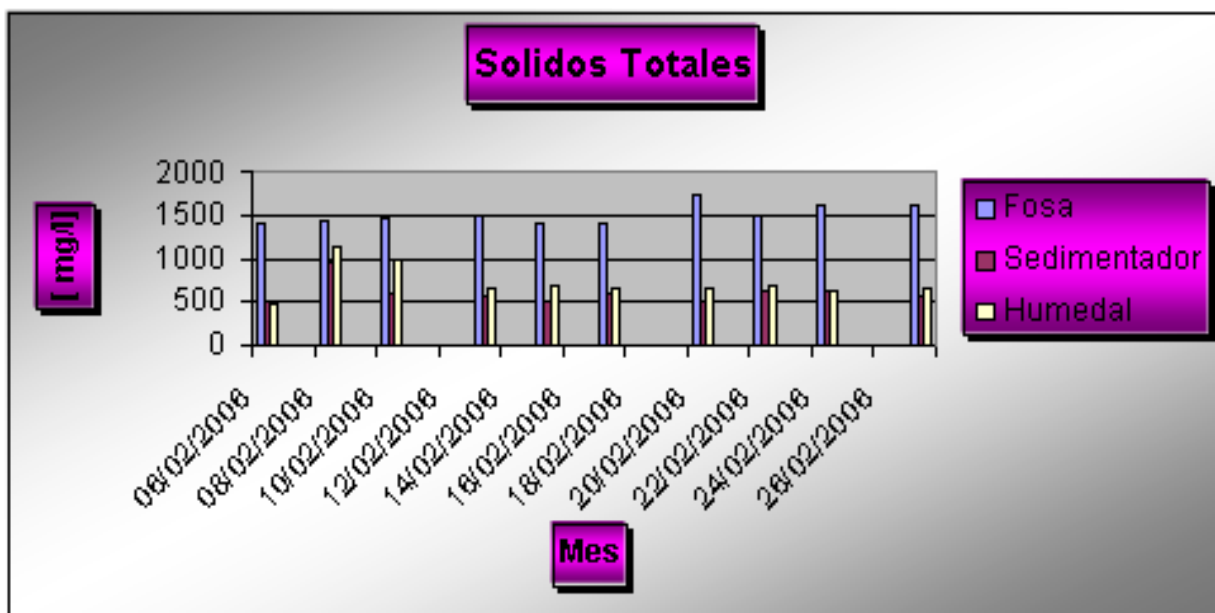


TABLA A-3

pH

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
06-Feb-06	7.31	2.36	7.44
08-Feb-06	7.25	7.12	6.65
10-Feb-06	7.19	7.25	6.48
13-Feb-06	7.29	7.58	6.94
15-Feb-06	7.65	7.55	6.9
17-Feb-06	7.54	7.7	6.83
20-Feb-06	6.76	7.59	6.92
22-Feb-06	6.89	7.55	6.6
24-Feb-06	6.68	7.13	6.67
27-Feb-06	6.7	7.24	6.8

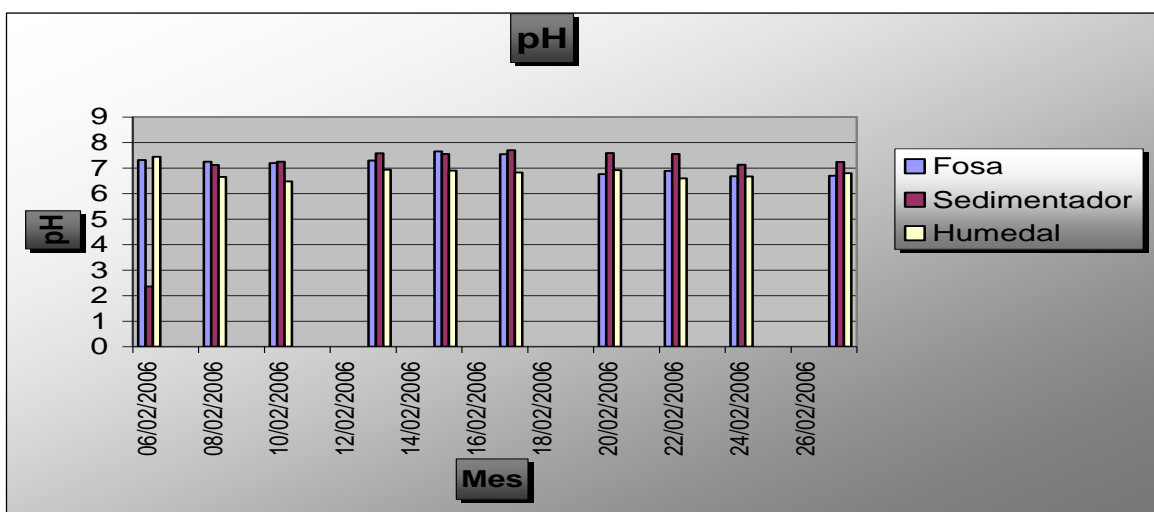


TABLA A-4
TEMPERATURA

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
06-Feb-06	19.2	19.5	19.5
08-Feb-06	18.7	18.7	17.8
10-Feb-06	21.5	21.5	19.2
13-Feb-06	19.4	19.6	19.5
15-Feb-06	20.7	22.6	21.6
17-Feb-06	20.7	22.4	21.6
20-Feb-06	20.9	23.6	21.9
22-Feb-06	21.2	22.6	21.9
24-Feb-06	21.7	23	21.1
27-Feb-06	22	21.5	20.7

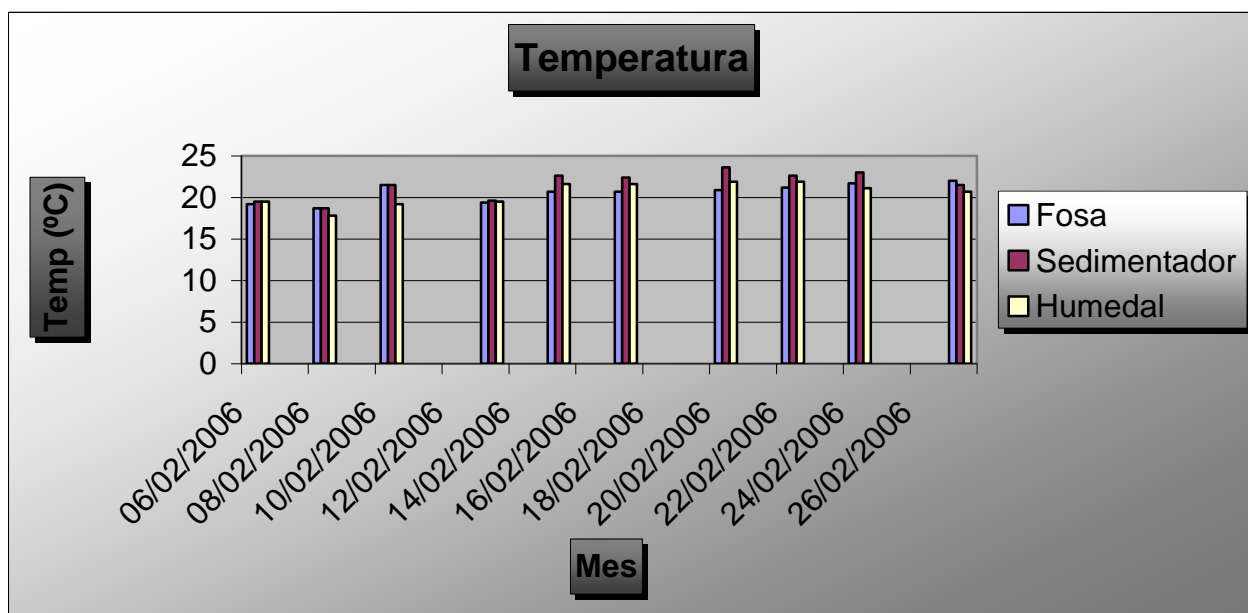


TABLA A-5

DQO

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
06-Feb-06	552.66	3186	111.5
08-Feb-06	3514.21	1418.6	118.66
10-Feb-06	3218.66	3218.66	270.2
13-Feb-06	905.3	1952	153.6
15-Feb-06	757	2102	242
17-Feb-06	698.66	2652	213.66
20-Feb-06	4413.66	189.66	84
22-Feb-06	928.6	343.66	200.33
24-Feb-06	2337	2818.66	70.33
27-Feb-06	2415	367	100.3

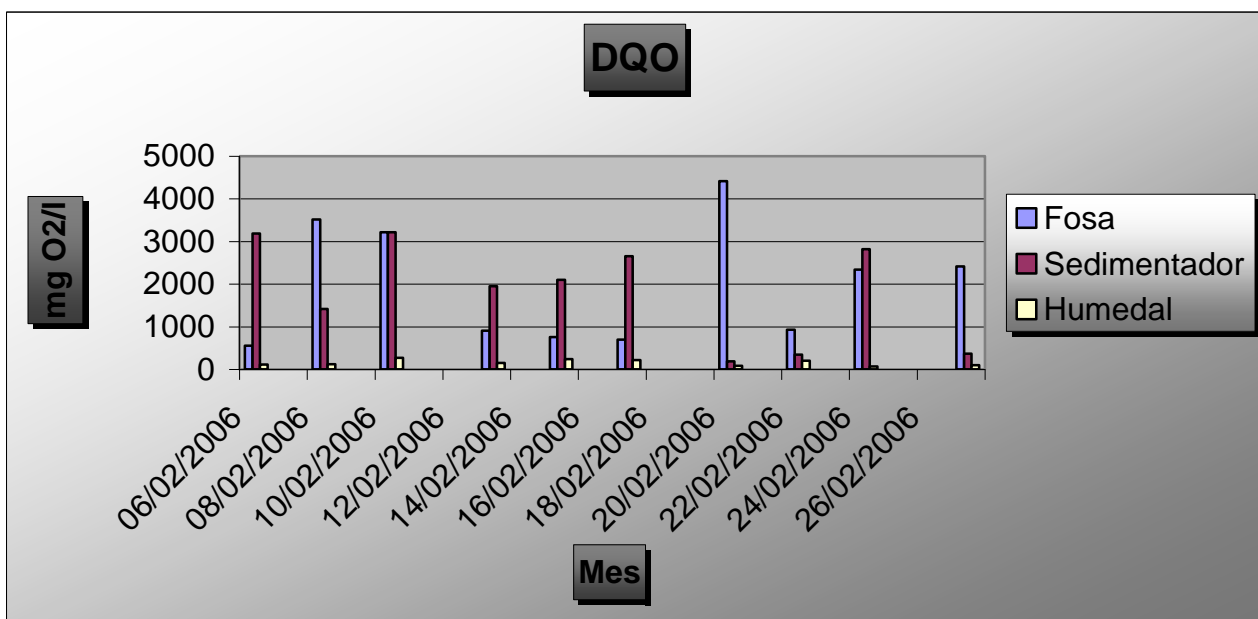


TABLA A-6
CONDUCTIVIDAD

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
03-Abr-06	2700	1099	1192
10-Abr-06	2600	1023	1200
17-Abr-06	2090	750	952
24-Abr-06	2010	618	941
01-May-06	2160	1080	853

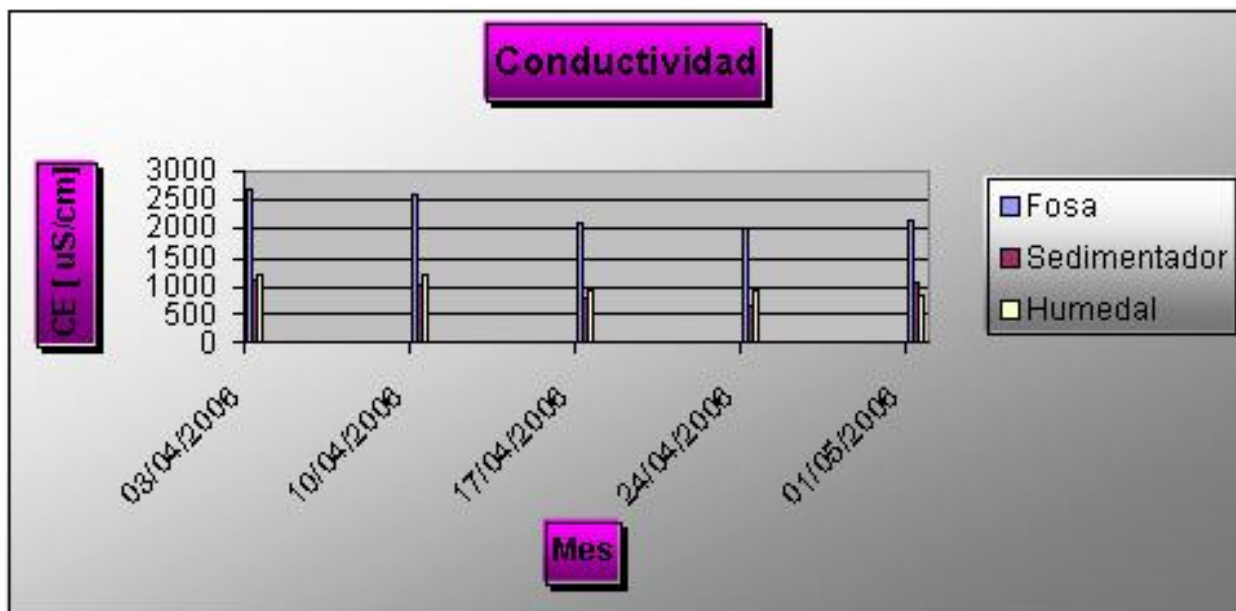


TABLA A-7
SÓLIDOS TOTALES

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
03-Abr-06	1566	636	692
10-Abr-06	1425	450	642
17-Abr-06	1235	358	610
24-Abr-06	1158	356	544
01-May-06	1244	625	497

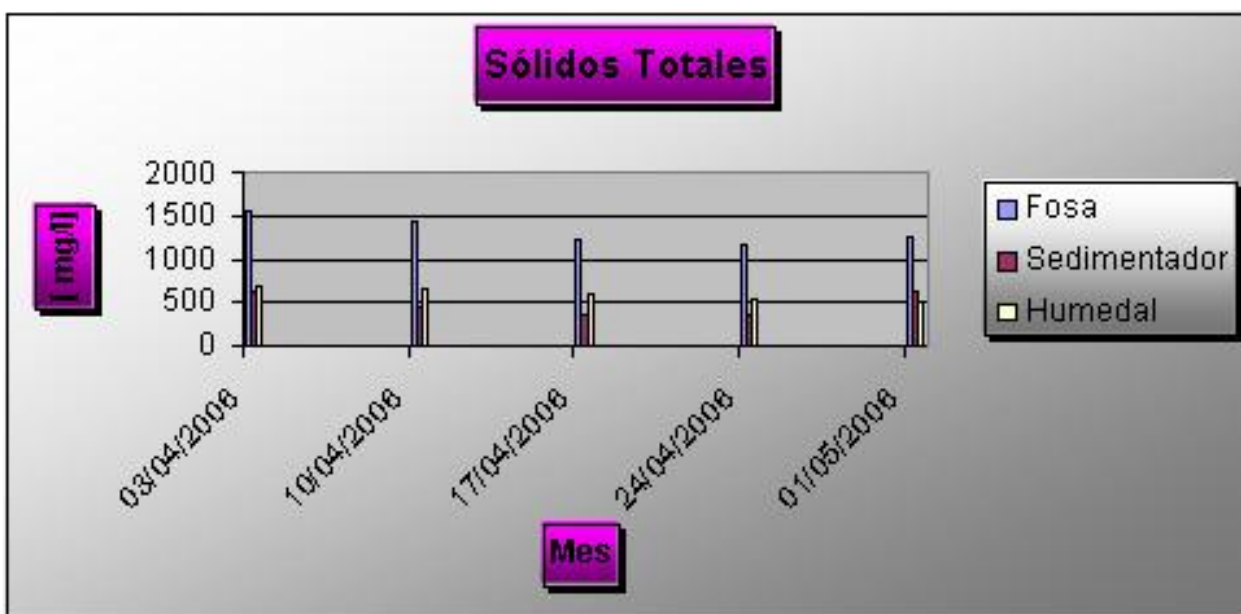


TABLA A-8

pH			
MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
03-Abr-06	7.13	7.56	7.11
10-Abr-06	7.2	7.5	6.6
17-Abr-06	7.19	7.41	6.9
24-Abr-06	7.17	7.4	6.78
01-May-06	6.94	7.46	7.03

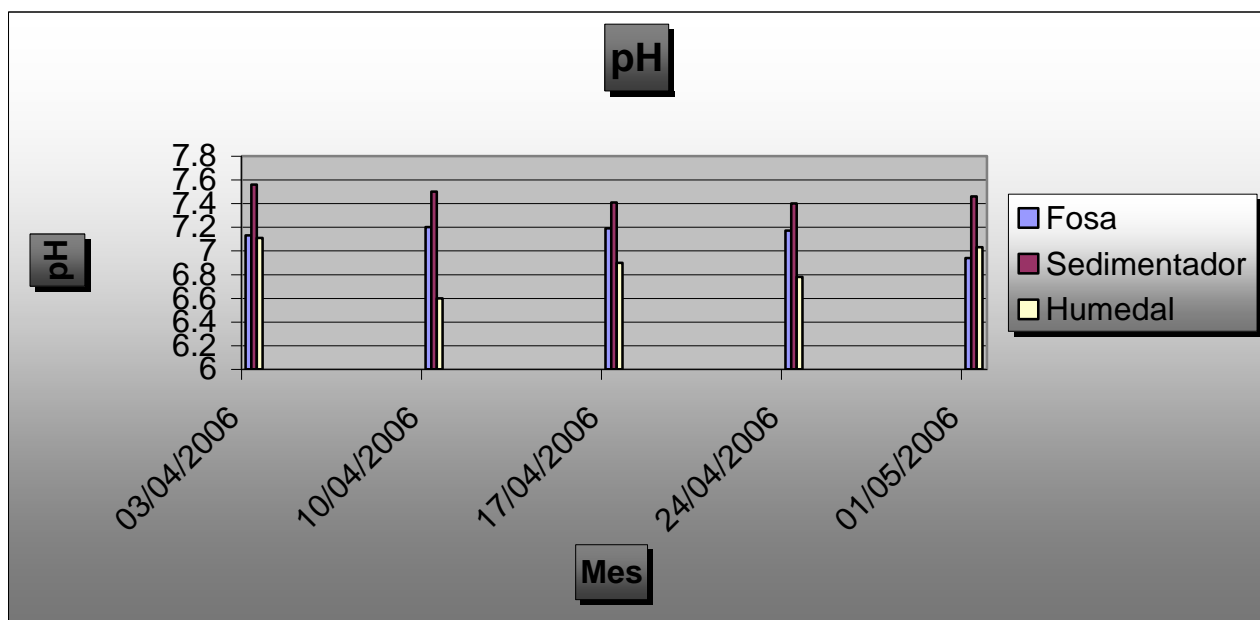


TABLA A-9
TEMPERATURA

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
03-Abr-06	19.7	21.2	20.1
10-Abr-06	19.5	21	20
17-Abr-06	22	21	21.3
24-Abr-06	23	23	23.2
01-May-06	19.8	21	19.8

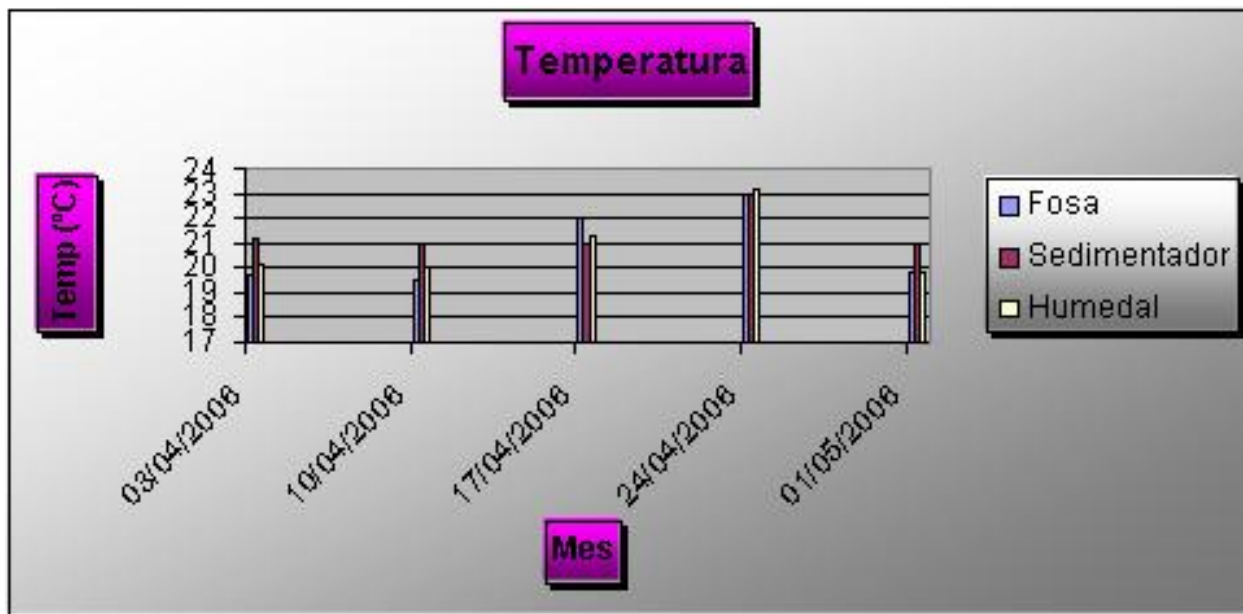


TABLA A-10

DQO

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
03-Abr-06	1118.66	308.66	168.66
10-Abr-06	852	350	351
17-Abr-06	725	358	270.2
24-Abr-06	682	132	128.66
01-May-06	808.66	298.66	88.66

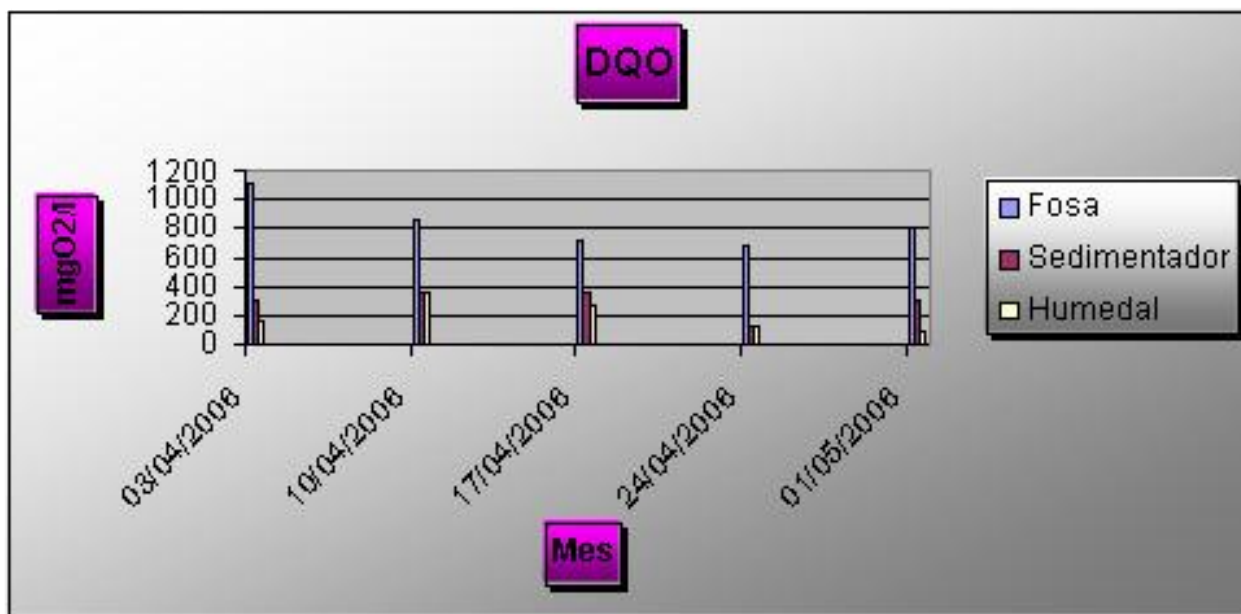


TABLA A-11

CONDUCTIVIDAD

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
05-Jun-06	0	995	592
12-Jun-06	0	1048	693
19-Jun-06	0	830	340
26-Jun-06	0	118	408
03-Jul-06	0	903	266

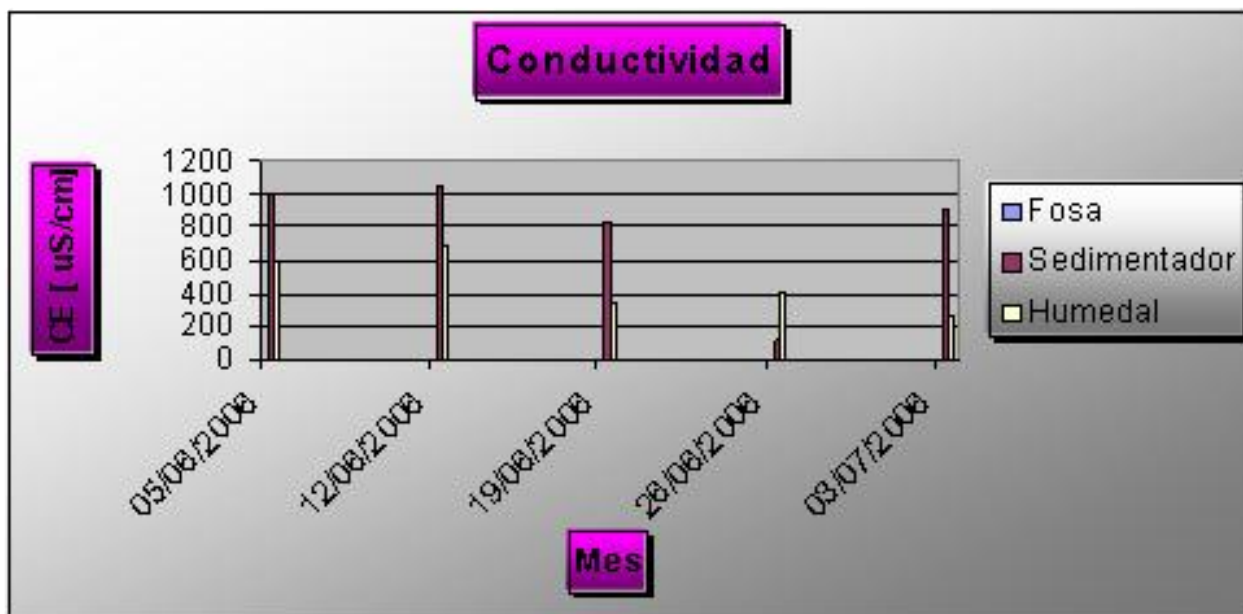


TABLA A-12
SÓLIDOS TOTALES

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
05-Jun-06	0	592	409
12-Jun-06	0	606	403
19-Jun-06	0	479	198.8
26-Jun-06	0	685	238
03-Jul-06	0	527	156.7



TABLA A-13

pH

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
05-Jun-06	0	7.62	6.84
12-Jun-06	0	7.35	6.63
19-Jun-06	0	7.72	6.78
26-Jun-06	0	7.57	6.65
03-Jul-06	0	7.72	6.12

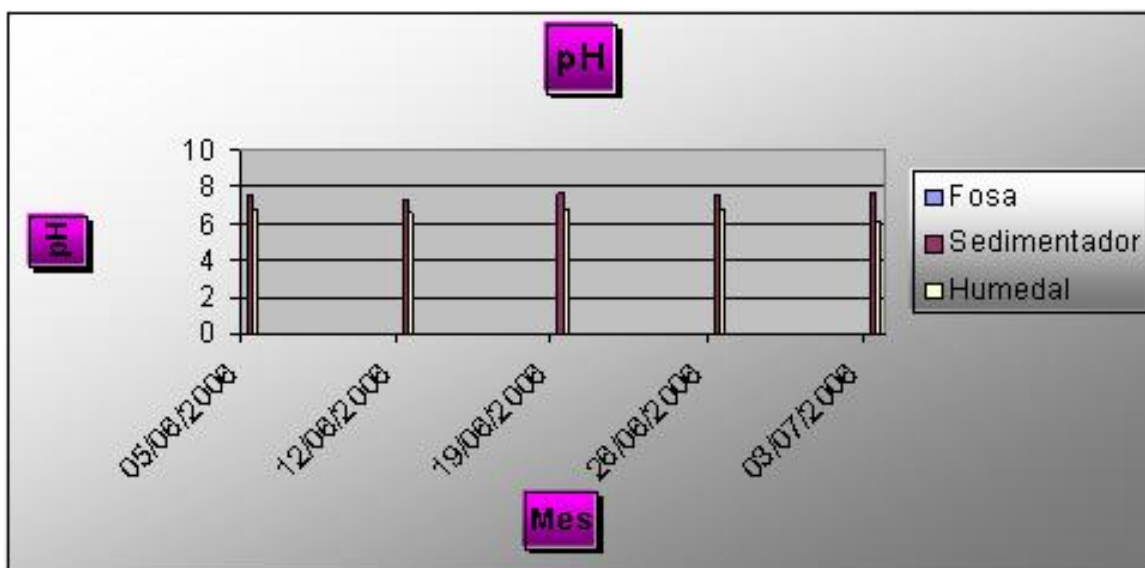


TABLA A-14

TEMPERATURA

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
05-Jun-06	0	20.6	20.6
12-Jun-06	0	26	23.8
19-Jun-06	0	23.5	22.4
26-Jun-06	0	24.7	22.6
03-Jul-06	0	22.9	21

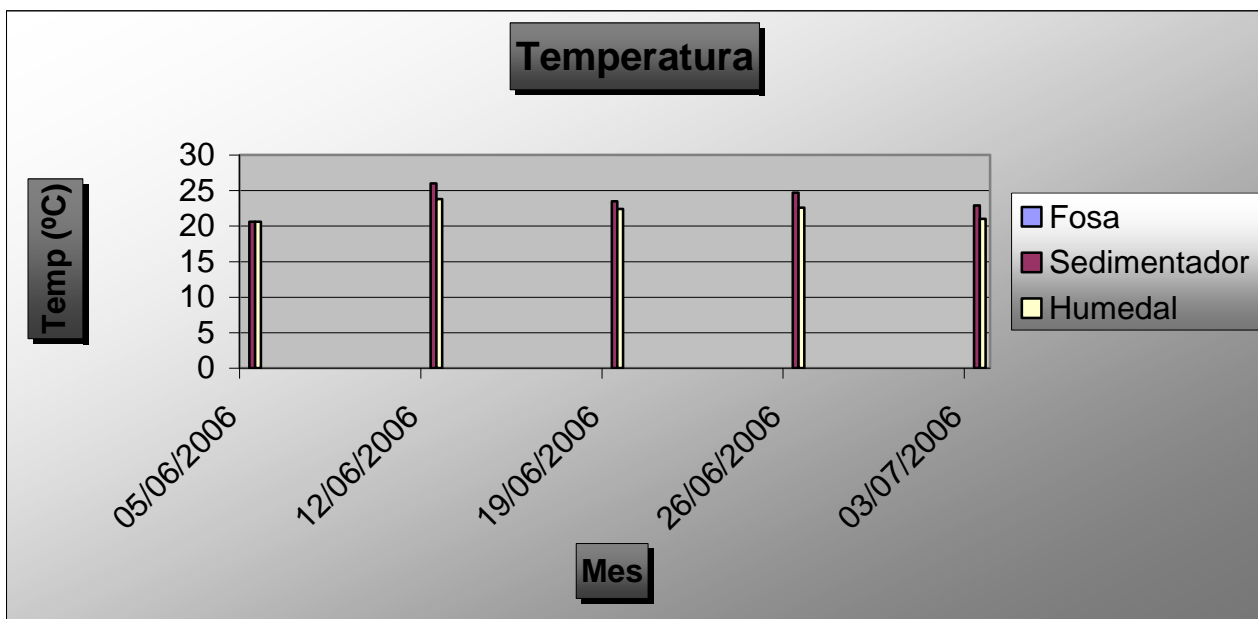


TABLA A-15

DQO

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
05-Jun-06	0	303.6	67
12-Jun-06	0	327	156
19-Jun-06	0	113	93.66
26-Jun-06	0	438	94
03-Jul-06	0	263	95.33

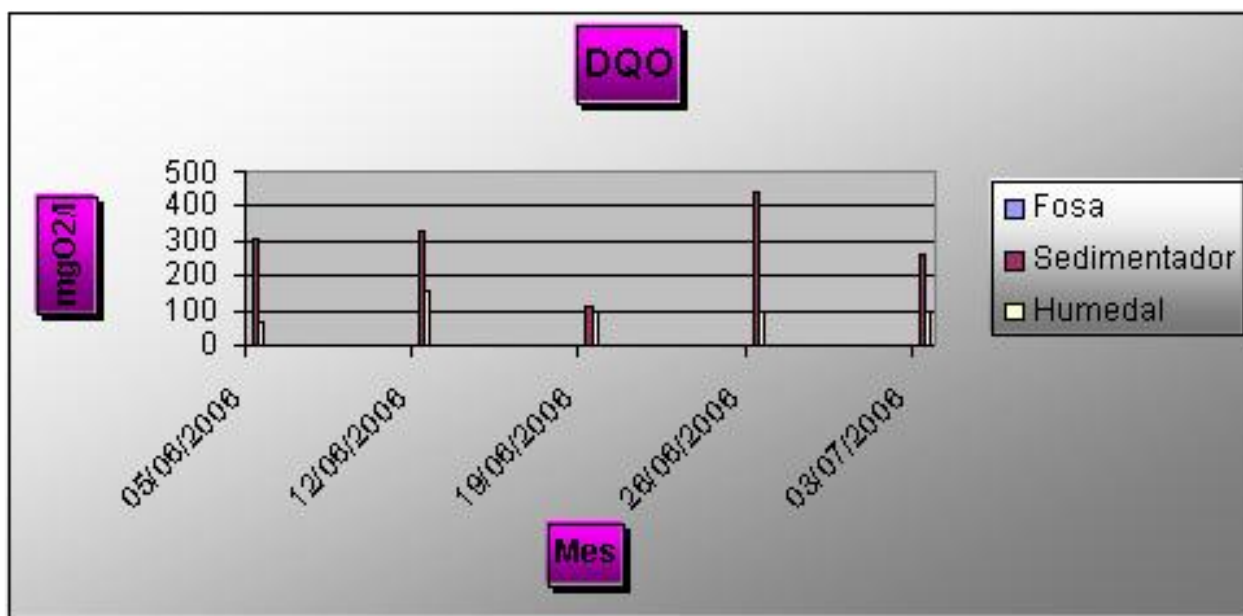


TABLA A-16
CONDUCTIVIDAD

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
07-Ago-06	0	1035	248
14-Ago-06	0	1149	246
21-Ago-06	0	1042	399
28-Ago-06	0	831	350

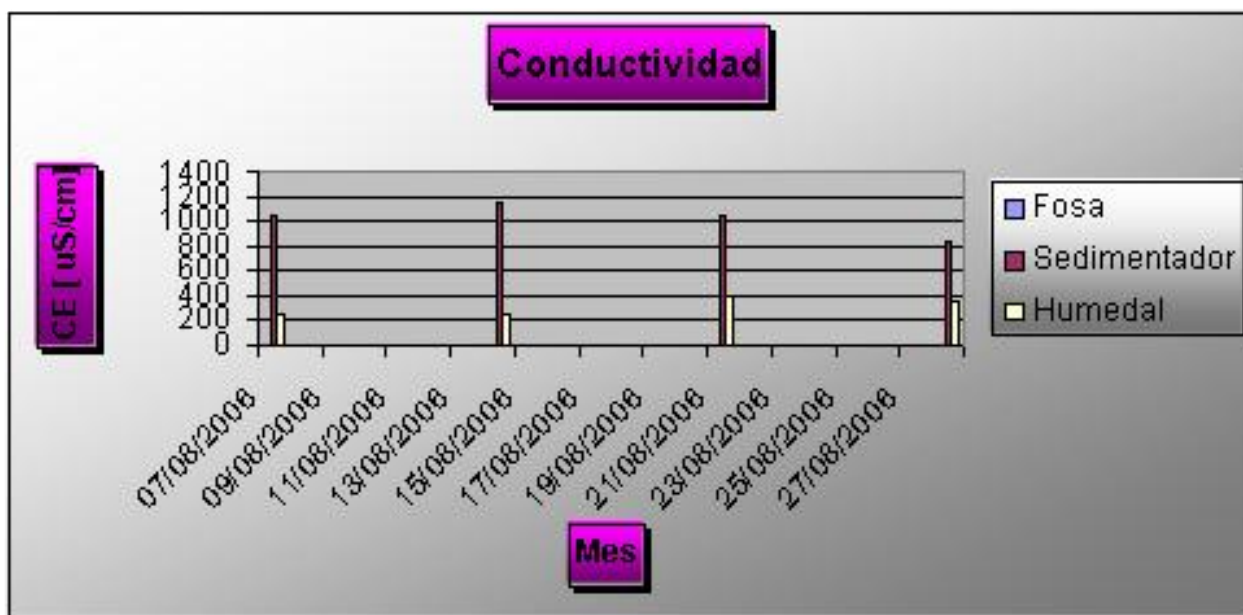


TABLA A-17
SÓLIDOS TOTALES

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
07-Ago-06	0	598	1470
14-Ago-06	0	673	145.9
21-Ago-06	0	603	23.4
28-Ago-06	0	480	204

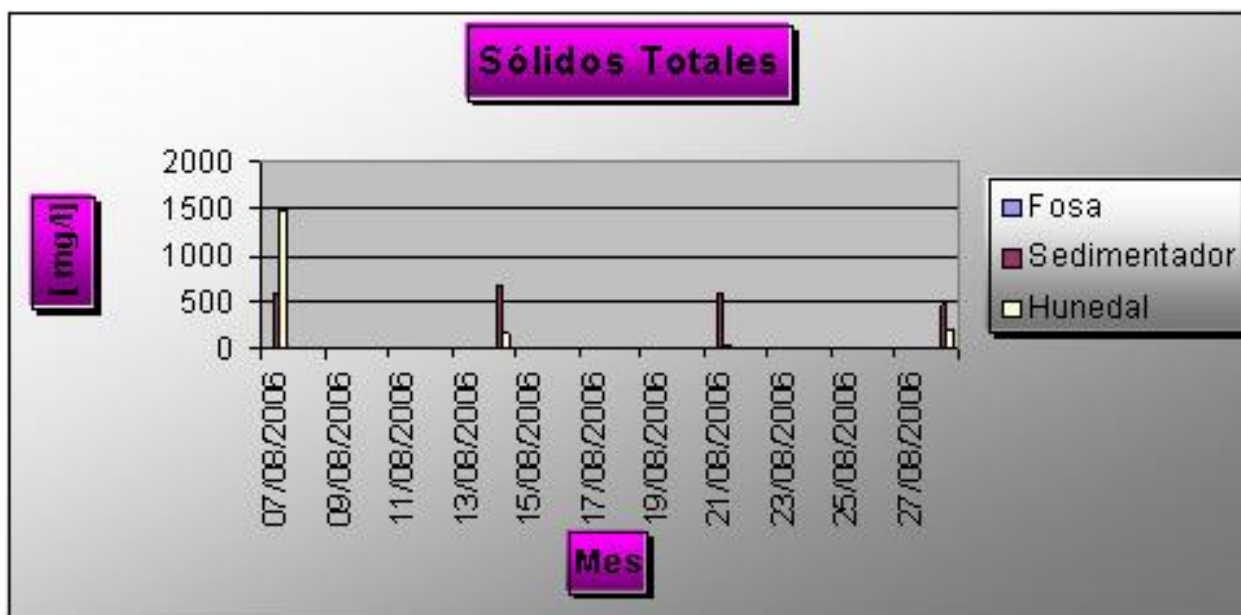


TABLA A-18

pH

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
07-Ago-06	0	7.36	6.25
14-Ago-06	0	7.78	6.26
21-Ago-06	0	7.77	6.41
28-Ago-06	0	7.88	6.58

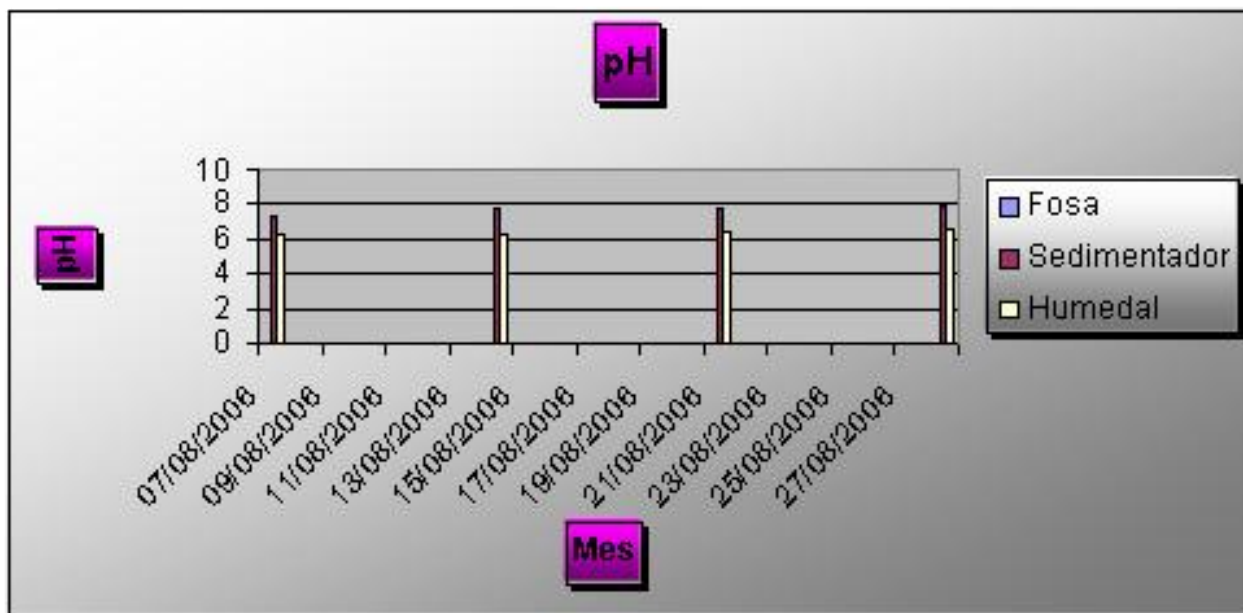
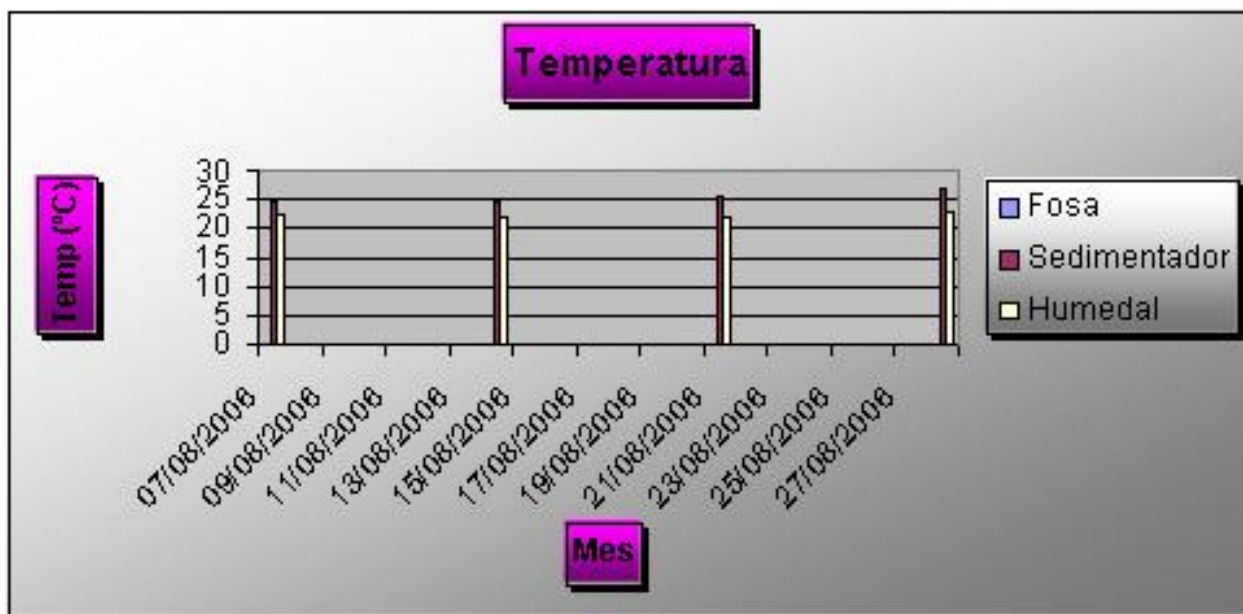


TABLA A-19
TEMPERATURA

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
07-Ago-06	0	24.7	22.6
14-Ago-06	0	24.8	21.8
21-Ago-06	0	25.7	22.1
28-Ago-06	0	26.7	22.9



Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

TABLA A-20			
DQO			
MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
07-Ago-06	0	433.6	127
14-Ago-06	0	425.33	100.33
21-Ago-06	0	275.3	47
28-Ago-06	0	227	97

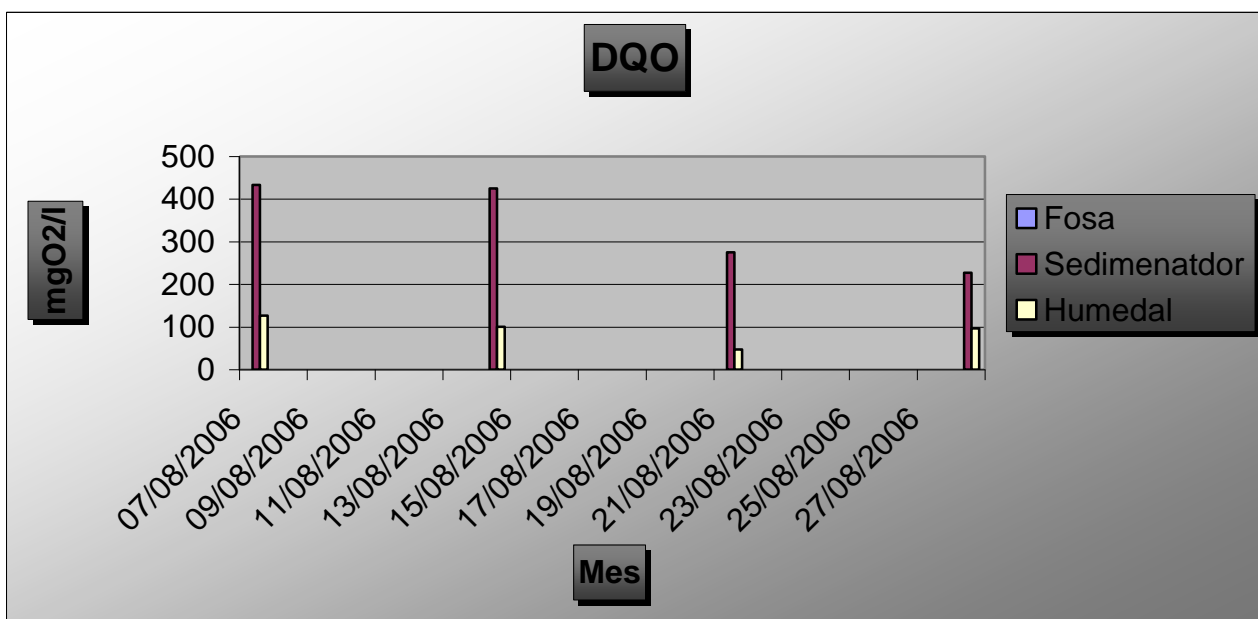


TABLA A-21

CONDUCTIVIDAD

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
04-Sep-06	0	841	530
11-Sep-06	0	730	453
18-Sep-06	0	652	385
25-Sep-06	0	750	425
04-Oct-06	0	925	350

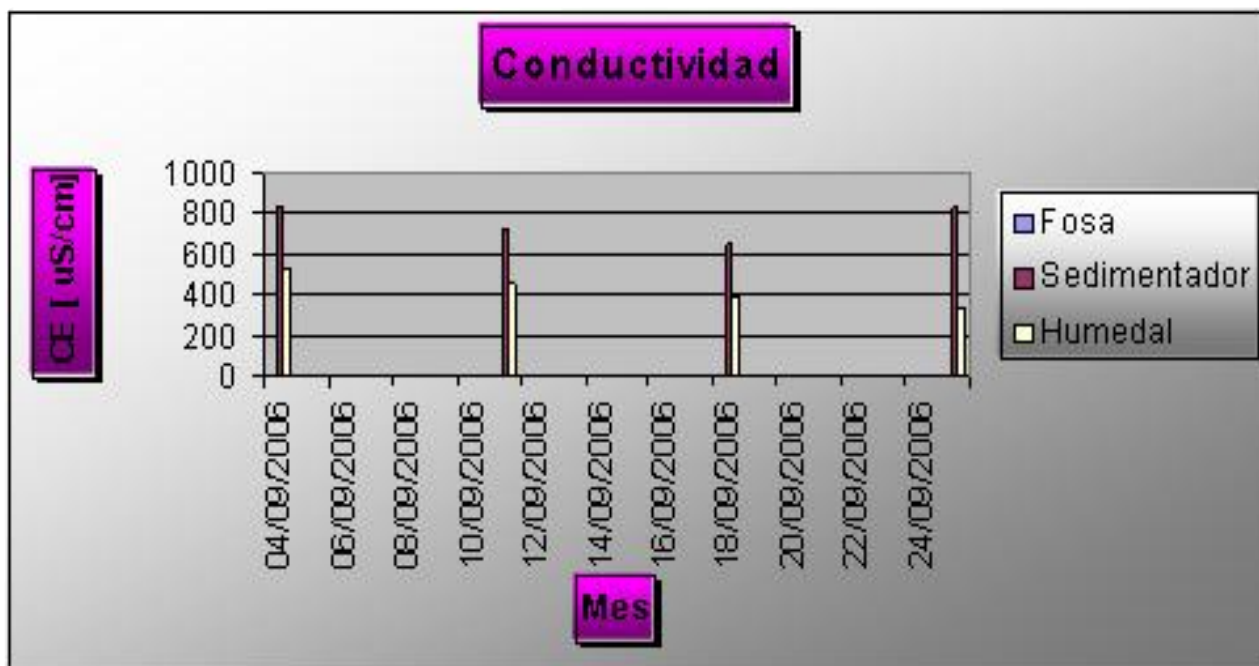


TABLA A-22

SÓLIDOS TOTALES			
MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
04-Sep-06	0	486	308
11-Sep-06	0	650	162
18-Sep-06	0	607	120
25-Sep-06	0	350	165
04-Oct-06	0	420	175

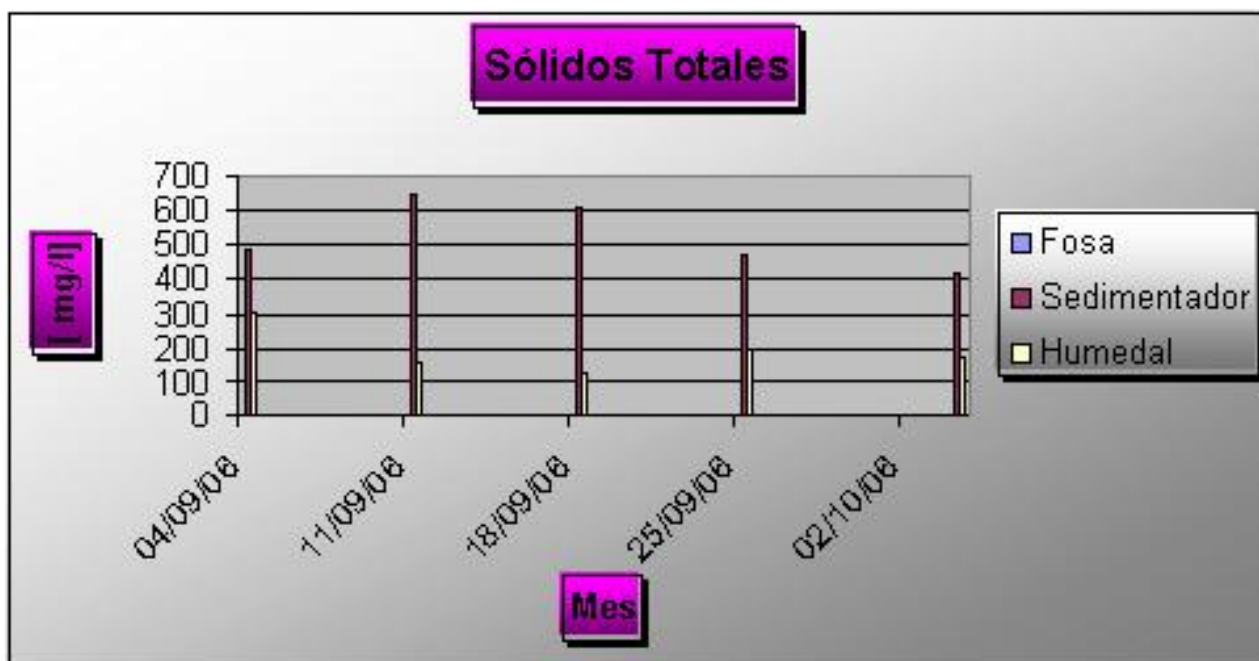


TABLA A-23

pH

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
04-Sep-06	0	7.16	6.45
11-Sep-06	0	7.45	6.58
18-Sep-06	0	7.75	6.65
25-Sep-06	0	7.4	6.57
04-Oct-06	0	7.74	6.25

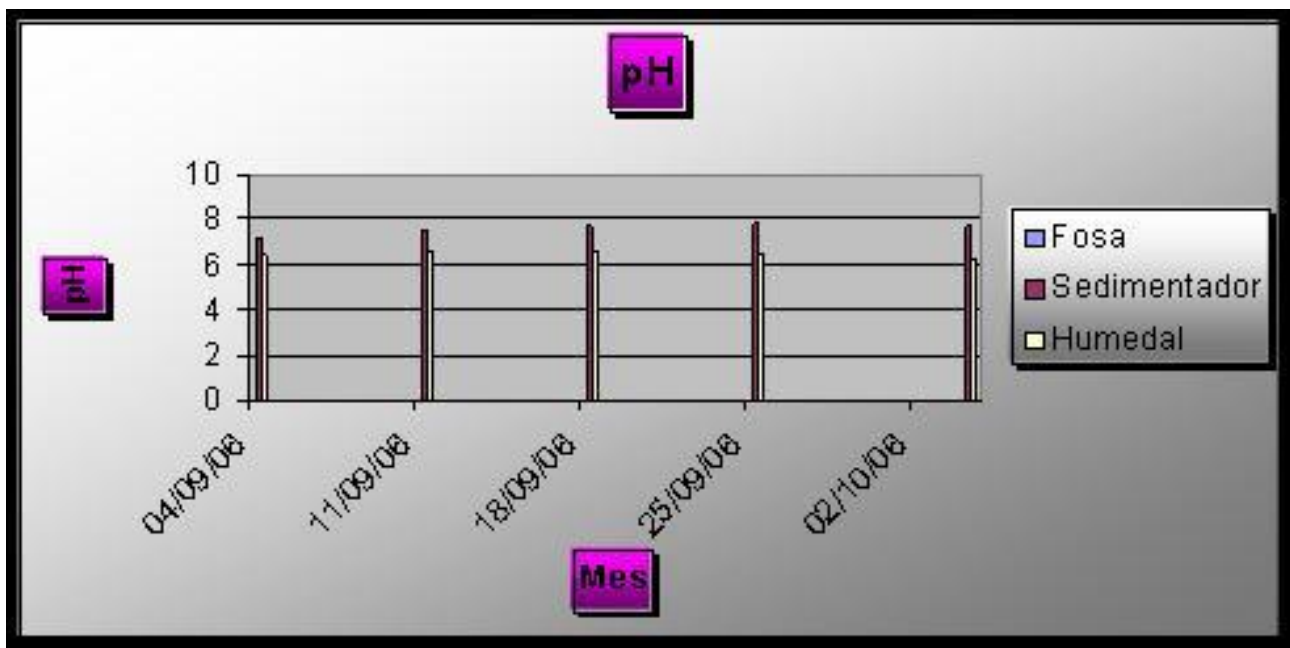


TABLA A-24

TEMPERATURA

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
04-Sep-06	0	23.2	21.9
11-Sep-06	0	24.5	21.9
18-Sep-06	0	25.2	22.5
25-Sep-06	0	22.2	23.2
04-Oct-06	0	21.8	21.7

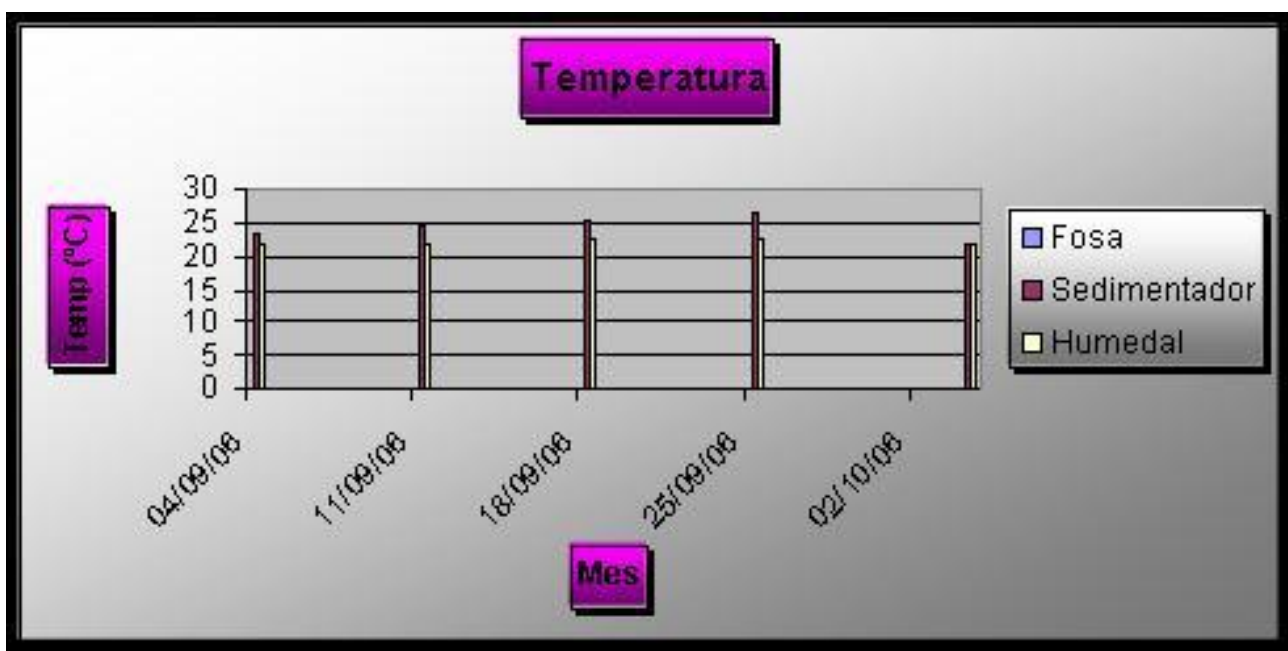
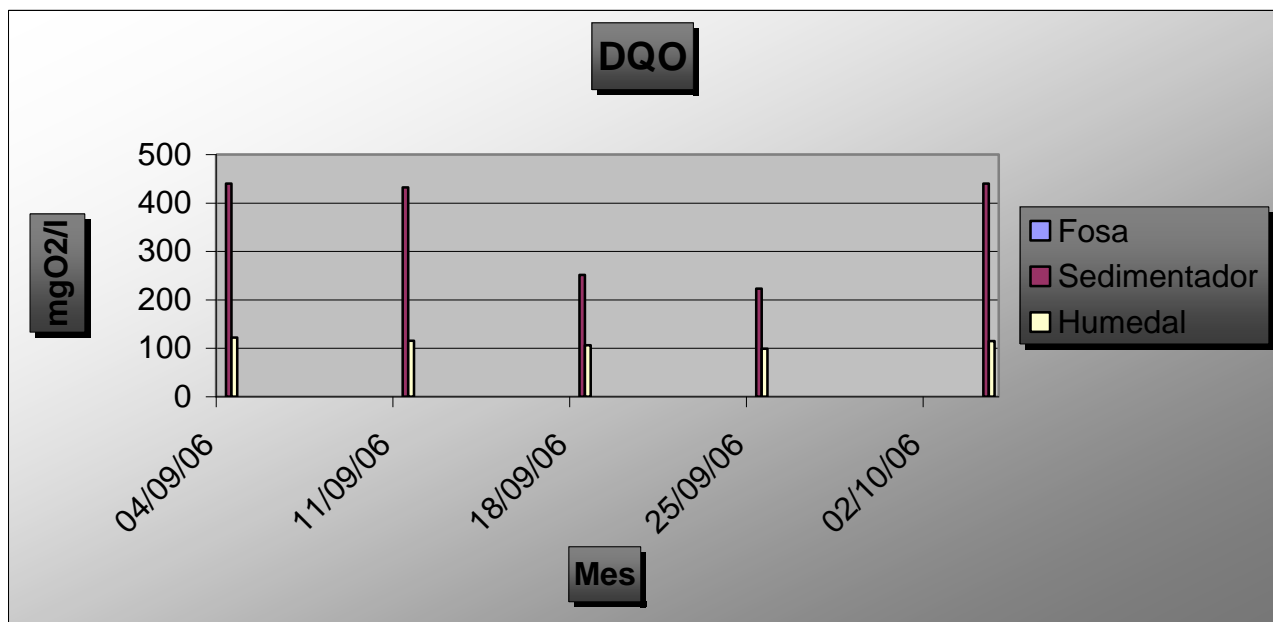


TABLA A-25

DQO

MES	FOSA	SEDIMENTADOR	HUMEDAL
04-Sep-06	0	440	122
11-Sep-06	0	432.1	115.2
18-Sep-06	0	251.2	106
25-Sep-06	0	275	102
04-Oct-06	0	440	115



ANEXO 3

METODOLOGÍA SEGUIDA

Metodología seguida

- Se toman 2mL de muestra problema.
- Se colocan en un tubo de ensayo con tapón de baquelita.

Se agrega una solución denominada “Solución de Digestión”. Para la preparación de la solución de digestión se emplean los siguientes reactivos:

(K₂Cr₂O₇ 10.216 g

H₂SO₄ 167 mL

HgSO₄ 33.3 g

En 1 L de H₂O destilada

- Posteriormente se agregan 3 mL de la solución de digestión a la muestra problema.

3 mL H₂SO₄/Ag₂SO₄

10.12 g en 1 L de H₂SO₄

- Se efectúa la digestión durante 30 min con una temperatura de 165°C en una estufa cerrando los tubos con tapones de baquelita.
- Se deja enfriar la solución.
- Se centrifuga la solución para separar los sólidos formados durante la digestión.
- Se realizan las lecturas correspondientes en un espectrofotómetro Marca Spectronic 21D y con ellas, mediante una curva de calibración, se determina la concentración de materia orgánica soluble medida como DQO.

- Las curvas de calibración se determinan con diferentes diluciones patrón hechas a partir de una solución original con una concentración de DQO soluble conocida, $C_8H_5KO_4$ (Tabla 3.1). En el Anexo 1 se presenta la metodología completa:

Matraz	DQO (mg/L)	$C_8H_5KO_4$ (mL)	H ₂ O destilada (mL)
1	0	---	25
2	50	1.56	23.44
3	80	2.5	22.5
4	100	3.125	21.87
5	200	6.25	18.75
6	300	9.375	15.625
7	400	2.5	12.5
8	500	15.625	9.37
9	600	18.75	6.25
10	800	25	---

Valores de pH

- Se toman 25 mL de la muestra.
- Se colocan en un vaso de precipitados de aproximadamente 50 mL.
- Se limpia el sensor (electrodo) con agua destilada antes de iniciar la medición secándose previamente con un pedazo de papel limpio.

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

- Se hacen las mediciones correspondientes con el equipo de campo marca Corning, modelo Check-Mate 90.
- Se coloca el sensor denominado “pH” en la base del aparato.
- Se coloca éste dentro de la solución de muestra recolectada.
- Se retiene durante unos segundos sumergido, hasta que el valor es leído en el aparato y no se modifica.
- Se escucha un sonido del aparato que indica que la lectura ya se estabilizó.
- Se toma la lectura.
- Se retira el electrodo de la muestra problema, se lava con agua destilada y se seca nuevamente con una toalla de papel.

Conductividad eléctrica

- Se toman 25 mL de la muestra.
- Se colocan en un vaso de precipitados de aproximadamente 50 mL.
- Se limpia el sensor con agua destilada antes de iniciar la medición secándose con una toalla de papel limpio.
- Se hacen las mediciones correspondientes con el equipo de campo marca Corning.

Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo

- Se coloca el sensor denominado “Conductividad Eléctrica” en la base del aparato.
- Se coloca éste dentro de la muestra recolectada.
- Se retiene sumergido hasta que se obtiene un valor constante en el aparato.
- Se escucha un sonido del aparato que indica que la lectura ya se estabilizó.
- Se toma la lectura.
- Se retira el electrodo de la muestra problema, se lava con agua destilada y se seca nuevamente con un pedazo de papel.

GLOSARIO

Absorción: Cuando un sólido toma moléculas en su estructura. Acción de absorber, dicho de una sustancia sólida: Ejercer atracción sobre un fluido con el que está en contacto, de modo que las moléculas de este penetren en aquella. Dicho de un tejido orgánico o de una célula: Recibir o aspirar materias externas a ellos, ya disueltas, ya aeriformes.

Acidez: La capacidad cuantitativa del agua de neutralizar una base, expresada en equivalente de carbonato de calcio en ppm o mg/L. El número de los átomos de hidrógeno que están presente determina esto. Es medido generalmente por medio de una valoración con una solución de hidróxido de sodio estándar.

Acuífero: Una capa en el subsuelo que es capaz de transportar un volumen significativo de agua subterránea.

Adsorción: Separación de líquidos, de gases, de coloides o de materia suspendida en un medio por adherencia a la superficie o a los poros de un sólido.

Aerobio: Organismos que requieren oxígeno libre (elemental) para su desarrollo.

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 término por influente.

Agentes contaminantes biodegradables: Agentes contaminantes que son capaces de ser descompuestos bajo condiciones naturales.

Agentes contaminantes recalcitrantes: Agentes contaminantes que NO son capaces de ser descompuestos bajo condiciones naturales o cuya tasa de descomposición es muy baja.

Agua: Es un compuesto químico formado por dos partes de hidrógeno y una parte de oxígeno, en volumen. Puede tener en solución o en suspensión a otros materiales sólidos, líquidos o gaseosos. Su fórmula es H₂O.

Agua potable: Agua exenta de contaminación objetable, minerales e inocua, y que se considera satisfactoria para el consumo humano.

Aguas negras: Son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos.

Aguas negras domésticas: Son las que contienen desechos humanos, animales y caseros. También se incluye la infiltración de agua de lluvia y aguas subterráneas.

Aguas negras sanitarias: Son las mismas que las domésticas, pero que incluyen no solamente las aguas negras domésticas, también una gran parte sino es que todos los desechos de la población (hospitalarios, industriales, de servicios, etc.).

Aguas negras combinadas: Son una mezcla de las aguas negras domésticas o sanitarias y de las aguas pluviales, cuando se colectan en las mismas alcantarillas.

Aguas pluviales: Forman todo el escurrimiento superficial de las lluvias, que influyen desde los techos, pavimentos y otras superficies naturales del terreno.

Aguas receptoras: Un río, un lago, un océano, una corriente de agua u otro curso de agua, dentro del cual se descargan aguas residuales o efluentes tratados.

Aguas residuales: Fluidos residuales en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja o industria que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.

Aguas residuales municipales: Residuos líquidos, originados por una comunidad. Posiblemente han sido formadas por aguas residuales domésticas y/o descargas industriales y/o agrícolas y/o pecuarias y/o de servicios, etc.

Aireación: Técnica que se utiliza en el tratamiento de aguas que exige una fuente de oxígeno, conocida comúnmente como purificación biológica aerobia del agua. El agua se pone en contacto con las burbujas de aire por medio de instalaciones de la aireación. El aire es presionado a través de la superficie del agua, éste burbujea y el agua se provee del oxígeno del aire.

Alcalinidad: La alcalinidad significa la capacidad amortiguadora del agua; la capacidad del agua de neutralizar. Evita que los niveles de pH del agua lleguen a ser demasiado básicos o ácidos. Puede alcanzarse también añadiendo dióxido de carbono al agua. La alcalinidad estabiliza el agua en los niveles del pH alrededor de 7. Sin embargo, cuando la acidez es alta en el agua la alcalinidad disminuye, puede causar condiciones dañinas para la vida acuática. En química del agua, la alcalinidad se expresa en ppm o en mg/L de carbonato de calcio equivalente. La alcalinidad total del agua es la suma de las tres clases de alcalinidad; alcalinidad del carbonato, del bicarbonato y del hidróxido.

Anaerobio: Bacterias que se desarrollan en ausencia de oxígeno libre y que realizan sus reacciones de oxidación-reducción empleando otras sustancias.

Anóxico: Ambiente carente de oxígeno.

Azolve: En México, lodo o basura que obstruye un conducto de agua. Sustancia gelatinosa y viscosa que se acumula durante el recorrido del agua a través de un

conducto, resultado de la actividad de los organismos en las aguas y/o de acumulación de residuos vertidos a los conductos de agua.

Bacterias: Las bacterias son organismos vivos, de tamaño microscópico, que constan de una célula y su proceso vital, así como sus funciones son similares a la de los vegetales, generalmente no pigmentadas los cuales se reproducen por división en uno, dos o tres planos. Se encuentran como células aisladas, en grupos, en cadenas o filamentos y no requieren luz para su proceso vital.

Bacterias coliformes: Bacterias que sirven como indicadores de contaminantes y patógenos provenientes de heces de origen animal o humano cuando son encontradas en las aguas. Estas son usualmente encontradas en el tracto intestinal de los seres humanos y otros animales de sangre caliente.

Bacterias parásitas: Son las que viven normalmente a expensas de otro organismo vivo, llamado huésped, porque necesitan recibir el alimento preparado para consumirlo y no se desarrollan fuera del cuerpo.

Bacteria saprófita: Son la que se alimentan de materia orgánica muerta, descomponiendo los sólidos orgánicos para obtener el sustento necesario, y produciendo a su vez sustancias de desecho que consisten en sólidos orgánicos e inorgánicos.

Biodegradación: Proceso de descomposición de las sustancias orgánicas por medio de microorganismos (principalmente bacterias aerobias o anaerobias) en sustancias más simples como bióxido de carbono, agua y amoníaco.

Biopelícula: Bacterias que se aglomeran entre sí mediante una masa gelatinosa que ellas mismas excretan (sustancias exopoliméricas), adhiriéndose también al material del lecho o soporte inerte.

Centrifugación: Proceso de separación, el cual usa la acción de la fuerza centrífuga para promover el asiento de partículas que se encuentran mezcladas con líquidos.

Coloides: Material de muy pequeño tamaño, en el intervalo de 10^{-5} a 10^{-7} m de diámetro.

Coliformes: 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 en agua de suministro.

Concentración: Es una medida de la cantidad de sustancias disueltas contenidas por unidad de volumen de solución. Puede expresarse como partes por millón o miligramos por litro, miliequivalentes por litro, granos por galón, libras por millón de galones, etc.

CE (Conductividad eléctrica): Representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estados de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura.

Conductividad hidráulica: Capacidad de un lecho o soporte inerte de transportar un fluido a través de los poros.

Contaminantes: Son aquellos elementos o compuestos que, en determinadas concentraciones, pueden producir efectos negativos en la salud humana y en el ambiente, dañar la infraestructura hidráulica o inhibir los procesos de tratamiento de las aguas residuales.

DBO (Demanda bioquímica de oxígeno): La cantidad de oxígeno (medido en el mg/L) que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por los

microorganismos bajo condiciones de prueba específicas. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación biodegradable en aguas residuales.

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.

DQO (Demanda química de oxígeno): Cantidad de oxígeno (medido en mg/L) que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable, bajo condiciones de prueba específicas. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. En contraposición a la DBO, con la DQO prácticamente todos los compuestos son oxidados. A la relación DBO/DQO se le conoce como relación de biodegradabilidad (si es igual a uno se considera que los contaminantes son totalmente biodegradables y si es igual a cero se considera que son totalmente recalcitrantes o tóxicos).

Desechos industriales: Son las aguas, los materiales sólidos o los gases de desecho provenientes de los procesos industriales que no tienen ninguna utilidad dentro de ellos.

Desorción: Lo contrario a la adsorción; la eliminación de materia desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar ese material y/o para eliminarlo del medio en que se encontraba.

Efluente: La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc. Este es el agua producto dada por el sistema. Desde el punto de vista semántico, efluente es todo aquello que fluye fuera de un sistema y esto incluye también a los gases y partículas que salen al entorno. Por ello, siempre

es pertinente denominar efluentes líquidos a los primeros (agua o sistemas acuosos o líquidos en general) y efluentes gaseosos a los segundos.

Emulsión: Dispersión de un líquido en otro. Este fenómeno solamente ocurre cuando uno de los líquidos es insoluble en el otro.

Eutrofización: Enriquecimiento del agua (del griego *eu* verdadero y *trofos* alimento), la cual causa un crecimiento excesivo de las plantas acuáticas e incrementa la actividad de los microorganismos degradadores, especialmente los anaerobios. Como resultado, los niveles de oxígeno disminuyen rápidamente y los organismos acuáticos aerobios se asfixian, haciendo la vida de estas especies imposible.

Evapotranspiración: Pérdida de agua del suelo a través de la evaporación, por evaporación directa y por la transpiración de las plantas, siendo este último fenómeno el más importante.

Hábitat: Del latín *habitat*, 3ª persona de singular del presente de indicativo de *habitāre*. Lugar de condiciones apropiadas para que viva un organismo, especie o comunidad animal o vegetal.

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

Karst. Topográficamente, es un espacio tridimensional que tiene capas de roca madre (generalmente carbonatos como dolomita y calizas) que permiten los drenajes de agua superficial hacia su interior formando numerosas cuevas. El ejemplo clásico en México son los *cenotes* en la península de Yucatán. El término *karst* es de origen paleo-europeo, de carra piedra y en la antigüedad se conocía a esta topografía como *carusardius*. A partir de 1177, los eslovacos las denominaron *grast* y desde 1230 los croatas *kras*.

Lixiviación: El proceso por el cual constituyentes solubles son disueltos y filtrados a través del suelo u otro medio sólido por la percolación del fluido a través de los poros.

Meme: El término “*meme*” fue acuñado por el biólogo Richard Dawkins para referirse a una unidad de información cultural que puede propagarse de una mente a otra de manera análoga a los genes (esto es, unidades de información genética). Ejemplos de estos “*memes*” según Dawkins son las tonadas de los “anuncios”, palabras copiadas de unos a otros, creencias, modas de ropa, maneras de hacer artesanías, etc. Estos “*memes*” pueden propagarse en grupos sociales o grupos menos integrados y él los denomina memeplesos o meme-complejos. Los que apoyan esta teoría de los “*memes*” incluso sugieren que evolucionan por selección natural, como la evolución biológica de Charles Darwin (Anónimo, 2007).

Papiros (*Cyperus papyrus*): Plantas de la división de las **Magnoliophyta**, clase Liliopsida, orden Cyperales, familia Cyperaceae. Usadas para depurar aguas residuales, ahora casi extintas en Egipto que eran usadas en la antigüedad como símbolo jeroglífico del Bajo Egipto y un motivo común en el arte. Sus raíces se usan como combustible; el meollo es comestible, los tallos se usaban para hacer sandalias, botes, tejidos (jarciería, ramo del comercio de los objetos de fibra vegetal), especialmente cajas, alfombrillas, telas y material para escribir (usado en Egipto hasta la introducción del papel en el Siglo VIII). Era exportado a través de todo el mundo mediterráneo. Este “papel”, llamado papiro, es famoso y se hace formando hojas al cortar longitudinalmente los tallos y pegarlos con agua del Nilo y la propia savia de la planta. Las hojas se pegaban final con final y se enrollaban en varas cilíndricas de madera para formar manuscritos.

Parámetros físicos: Son los que definen aquellas características del agua que responden a los sentidos del tacto, gusto, olfato o vista.

Parámetro: Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.

PIQAYQA: Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la UNAM.

pH: El valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado por el número de iones de hidrógeno presente. Es medido en una escala desde 0 a 14, en la cual 7 significa que la sustancia es neutra. Valores de pH por debajo de 7 indica que la sustancia es ácida y valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica.

Parásitos: Los parásitos son organismos que viven a expensas de un organismo hospedero o anfitrión al que causan daños sin matarlo inmediatamente. Los parásitos comúnmente desarrollan adaptaciones altamente especializadas que les permiten explotar los recursos del hospedero. La interacción biológica entre el parásito y el hospedero es un cierto tipo de simbiosis. La distinción clara entre parásitos y simbiotes es que éstos últimos no pueden mantenerse vivos fuera del hospedero, aunque una excepción es la de las bacterias, que pueden cultivarse en un laboratorio. El daño causado a un anfitrión por un parásito puede tomar muchas formas, desde la patología directa, incluyendo varios tipos especializados de daños de los tejidos, como la castración; hasta efectos más sutiles como la modificación de comportamiento del anfitrión. Muchos capullos, por ejemplo, usan a sus anfitriones involuntarios como "niñeras": los capullos jóvenes son apoyados por los adultos de la especie del anfitrión, aunque algunos capullos adultos ven por sí mismos. La interacción biológica entre el anfitrión y el parásito, como se considera por unos, es un tipo de simbiosis. Clásicamente, la distinción entre parásitos y simbióticos es de tipo metodológica, esto es, que los parásitos eran simbióticos, y estos no pueden ser guardados. Evolutivamente, el parasitismo es un modo de vida. Dependiendo de la definición usada, tantos como la mitad de todos los animales tienen al menos una fase parásita en sus ciclos de vida y es también frecuente en plantas y hongos.

Además, casi todos los animales libres que viven son el anfitrión de uno o varios parásitos.

Patógenos o agentes infecciosos: Agentes biológicos que pueden causar enfermedades a sus hospederos. Un agente patógeno o infeccioso es un agente biológico que causa la enfermedad o la enfermedad a su anfitrión. Éste es el término más usado para los agentes que interrumpen la fisiología normal de un animal multicelular o la planta. Sin embargo, un patógeno puede infectar organismos unicelulares de todos los reinos biológicos. El término patógeno es sacado del Griego παθογένεια, que significa " el nacimiento de dolor". El cuerpo humano tiene muchas defensas naturales contra los patógenos. El más común (como el Pneumocystis), tiene una forma que ayuda al sistema inmunológico humano y por ello es una bacteria "provechosa" en la flora normal del cuerpo humano. Sin embargo, si el sistema inmunológico o la bacteria "provechosa" son dañados de cualquier modo (como por la quimioterapia, el virus de inmunodeficiencia humano o antibióticos tomados para matar a otros patógenos), la bacteria patógena que estaba siendo mantenida a raya puede proliferar y causar daños al anfitrión. En tales casos se les llama infecciones oportunistas.

Partícula infecciosa proteínica (*Prion*): Del término en inglés *proteinaceous infectious particle*, a la cual le falta ácido nucleico (por analogía con **virion**), es un tipo de agente infeccioso hecho solamente de proteína. Se cree que los *prions* infectan a los organismos vivos al desdoblarse anormalmente en una estructura que es capaz de convertir a moléculas normales de proteína en el organismo a formas estructuradamente anormales. Sin embargo, el término en sí mismo no impide que haya otros mecanismos de transmisión que todavía no se conocen.

Retrete: Aposento dotado de las instalaciones necesarias para orinar y evacuar el vientre (en México estas instalaciones se conocen coloquialmente como "baños" o WC).

Rizosfera: Universo que contiene a las raíces de las plantas y que resulta afectado por el desarrollo de éstas.

Saprotrofos (saprobios o “saprofitas”): Organismos que medran sobre materia orgánica muerta. Es un organismo que obtiene sus sustancias nutritivas al vivir de la materia orgánica, por lo general muerta. Los saprofitos no son autótrofos (generar sus propios alimentos), sino que son considerados un tipo de heterótrofos. Ellos incluyen muchos hongos (el resto son parásitos o simbioses mutualistas), bacterias y protozoos. Saprofito es un término que ahora es considerado anticuado.

SDT (Sólidos disueltos totales): El peso por unidad de volumen de agua de sólidos suspendidos en un medio de filtro después de la filtración o evaporación, es la cantidad total de materia orgánica e inorgánica disuelta en el agua. Los sólidos disueltos en cantidades excesivas inhabilitan el uso para el consumo humano e industrial.

Sedimentación: Es la separación de los componentes del agua en dos fases, una fase sólida, que corresponde a los fangos o lodos y que está formada por partículas de sólidos suspendidos más pesados que el agua y que, por gravedad, se depositan en el fondo.

Sólidos coloidales suspendidos: Se definen como la diferencia entre sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos sedimentables.

Sólidos disueltos: Materiales sólidos que se disuelven totalmente en agua y pueden ser eliminados por filtración.

Sólidos inorgánicos: Son sustancias inertes que no están sujetas a la degradación o que tienen una tasa de degradación muy baja. Se les conoce frecuentemente como sustancias minerales: arena, grava, cieno y sales minerales del abastecimiento de agua que producen su dureza y contenido mineral.

Sólidos sedimentables: Son la proporción de los sólidos suspendidos en agua cuyo tamaño y peso es suficiente para que sedimenten en un período determinado, que generalmente es de una hora (densidad mayor que la del agua).

Sólidos orgánicos: Son materiales en suspensión o disueltos de origen animal o vegetal, que incluyen los productos de desecho de la vida animal y vegetal, la materia animal muerta, organismos o tejidos vegetales, pueden incluir también compuestos orgánicos sintéticos. Son sustancias que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno, pudiendo estar combinadas con nitrógeno, azufre o fósforo. Los grupos principales son las proteínas, los hidratos de carbono y las grasas. Pueden estar sujetos a degradación o descomposición por la actividad de las bacterias y otros organismos vivos, a menos que sean recalcitrantes a la degradación microbológica.

Sólidos suspendidos: Son aquellos que están en suspensión en medios acuáticos y que son perceptibles a simple vista en el agua, incluyen partículas flotantes mayores como arena, polvo, arcilla, sólidos fecales, papel, astillas de madera y otros materiales similares.

Sólidos totales: Son la totalidad de sólidos orgánicos e inorgánicos, tanto suspendidos como disueltos.

Solubilidad: La cantidad de masa de un compuesto que puede disolverse por unidad de volumen de agua.

Sustrato: Es el término empleado para indicar la materia orgánica o los nutrientes que pueden sufrir una conversión y que pueden ser un factor limitante en el tratamiento biológico.

Tanque séptico o fosa séptica: Un depósito subterráneo para almacenar las aguas residuales de casas que no están conectadas a las líneas de alcantarillado. Los residuos van directamente desde los sistemas sanitarios al depósito.

Temperatura: Potencial o grado calorífico referido a un cierto cuerpo.

Tratamiento primario de aguas residuales: La eliminación de sólidos suspendidos, flotando o precipitados de un agua residual sin tratar.

Tratamiento secundario: La eliminación o reducción de contaminantes y DBO del efluente procedente del tratamiento primario de las aguas residuales. Puede ser bioquímico o químico.

Tratamiento terciario: Limpieza avanzada de aguas residuales que va más allá del secundario, eliminando nutrientes como el fósforo, nitrógeno y la mayoría de los contaminantes químicos que no se eliminaron así como sólidos suspendidos que no pudieron separarse en el sistema secundario.

Tiempo de retención celular: Es el tiempo promedio que los organismos depuradores permanecen en el reactor. Cuando los sistemas de reacción son del tipo “perfectamente mezclado”, el tiempo de retención celular es igual al de residencia hidráulica. En los 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.

Tiempo de residencia hidráulica, TRH: Es el tiempo promedio empleado por el líquido en la etapa de remoción y es, por lo tanto, el tiempo de contacto entre los organismos depuradores y las aguas residuales dentro del reactor. La ecuación que se emplea para estimarlo es:

$$TRH = \frac{L_{CELHUMEDAL} * W_{CELHUMEDAL} * y_{PROFUNDO} * n_{POROSIDAD}}{Q_{CAUDAL}}$$

$$Q = \frac{Q_E + Q_O}{2}$$

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

Q = Caudal medio a través del humedal (m³/d)

Q_E = Caudal de entrada (m³/d)

Q_O = Caudal de salida (m³/d)

Tiempo de retención celular, TRS: Es el tiempo promedio que permanecen en un reactor bioquímicos los microorganismos depuradores en la etapa de remoción y es, por lo tanto, el tiempo de actividad de los organismos depuradores dentro del reactor. Generalmente, en los sistemas de flujo continuo donde los microorganismos entran y salen del reactor sin que haya acumulación, este tiempo TRS es igual al TRH. En aquéllos donde los microorganismos se acumulan formando biopelículas dentro del reactor (empacados de biomasa –lechos de lodos-, reactores de biodiscos, biopelículas sobre raíces y rizomas y sobre materiales “inertes”), el TRS es mayor que el TRH.

Virión: Es un neologismo que se utiliza para referirse a una sola partícula viral infectiva, para diferenciarla de virus, que viene del latín y que significa veneno o cosa maligna y que se usó por primera vez en la lengua inglesa en 1392. La palabra virulento o venenoso se empezó a usar en 1400. El significado de “agente causante de enfermedades infecciosas” se reporta en 1728 antes del descubrimiento de los virus por el biólogo ruso-ucraniano Dimitry Ivanovsky en 1892. El adjetivo viral data de 1948. Hoy, la palabra virus se usa para describir a ñps virus biológicos y, como

metáfora, para designar a otras cosas que se reproducen parasíticamente como los “**memes**” o virus de las computadoras, desde 1972.

BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo. 2006. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Agosto 12, 2006]. Disponible en: <http://www.geocities.com/jalarab>.
- Arreguín-Rojas, A., Durán-de-Bazúa, C. 2007. Proyecto: “*Los humedales purificadores de agua*”, adaptados como estrategia didáctica en apoyo a los programas de biología y química del Bachillerato de la UNAM. Proyecto conjunto: CCH-UNAM, PIQAyQA-Facultad de Química-UNAM y DGO-UNAM. En proceso de acuerdo. México D.F. México.
- Bahlo, K., Wach, G. 1995. Naturnahe Abwasserreinigung: Planung und Bau von Pflanzenklaeranlagen. Auflage Staufen bei Freiburg. 3ª Ed. Pp. 138-146. Freiburg, RFA.
- Brix, H. 1993a. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. En *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. G. A. Moshiri [ed.], pp. 9-22. CRC Press / Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, FL. EEUU.
- Brix, H. 1993b. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. En *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. G. A. Moshiri [ed.], pp. 391-398. CRC Press / Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, FL. EEUU.
- CADF. 2007. Comisión de Aguas del Distrito Federal. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Marzo 15, 2007]. Disponible en: http://aguamx.www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/8agua.html.

CNA. 2007. Comisión Nacional del Agua. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Marzo 15, 2007]. Disponible en: <http://www.cna.gob.mx/conagua/Default.aspx>

Collado-Lara, R. 1992. Depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Ed. Paraninfo, S.A. Madrid, España.

Durán-de-Bazúa, C. 1994. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso. Pub. PIQAyQA-FQ-UNAM. Pp. 4-44. México, D. F. México.

Durán-de-Bazúa, C. (Profesora); Rodríguez-Cruz, A.; Varela-Montellano, E. (Estudiantes). 2003. Manual de construcción, arranque y operación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de casas habitación en zonas rurales o suburbanas y para el tratamiento terciario de aguas residuales de casas habitación o de condominios verticales suburbanos. *Vol. 6 bis, Serie: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA*. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y Quim. Amb. ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 27 pags. 500 ejemplares, 1ª. Ed. (1998), 2ª. Ed. (2003).

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Luna-Pabello, V.M. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. Solicitud de Registro de Patente: Diciembre 15, 1998. Otorgada el 21 de octubre de 2002. Patente Núm. 210924. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes. México D.F. México.

Esponda-Aguilar, P.L. 2001. 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. Agosto 20. México D.F. México.

Fenoglio-Limón, F. 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. 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. México, D.F. México.

Gaitán-Zamora, N.A. 2007. Evaluación ecotoxicológica de "composta" producida con residuos vegetales de humedales artificiales y lodos primarios a escala laboratorio. Tesis de maestría (Ingeniería Ambiental: Sustancias y residuos peligrosos). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

García-Arreola, S.L. 2007. Remoción de materia orgánica en un humedal artificial de flujo horizontal a escala prototipo ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Estudios Profesionales Cuautitlán, UNAM. México D.F. México.

García-Vázquez, L. 2004. Uso de reactores biológicos (humedales artificiales de flujo vertical) para depurar aguas residuales de tipo sanitario. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Ingeniería Química. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Pue., México.

Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental), UNAM. México D.F. México.

- 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. C. Durán de Bazúa y L.I. Ramírez Burgos (Eds.). Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8. Pp. 232-245. México D. F. México.
- Huanosta-Gutiérrez, T. 2006. Estudio de la dinámica y remoción de especies de nitrógeno en humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio. Tesis profesional (Química). Facultad de Química, UNAM. México, D.F. México.
- IMAC. 2007. Iniciativa Mexicana de Aprendizaje para la Conservación. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Marzo 15, 2007]. Disponible en: www.imacmexico.org/ev_es.php?ID=16643_208&ID2=DO_TOPIC.
- INE. 2007. Instituto Nacional de Ecología. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Marzo 15, 2007]. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/8/breve.html>.
- Kneidinger, Ch. 1997. Construction and investigation of a constructed wetland system for the tertiary treatment of the maize processing industrial wastewater. Master of Engineering Thesis. Universidad BOKU de Viena. Mayo. Viena, Austria.
- Metcalf y Eddy. 1991. Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales, disposición y reúso. Metcalf and Eddy. McGraw-Hill International Editions. 3a edición. Nueva York, EE.UU.
- Netter, R. 1993. Planted soil filter - A wastewater treatment system for rural areas. Water-Sci. Technol. 28(10):133-140.

OMS. 2008a. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Junio 16, 2008]. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/2005advocguide/es/index.html.

OMS. 2008b. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Junio 16, 2008]. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/es/

Padrón-López, R. M. 2005. Depuración de aguas residuales domesticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas. Tesis de maestría en ciencias ambientales. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. México.

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. C. Durán de Bazúa y L.I. Ramírez Burgos (Eds.). Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Lid Impresores. ISBN 968-36-5876-8. Pp. 191-196. México D. F. México.

RAMSAR. 2008. Consulta en las redes internacionales [Fecha de consulta: Junio 16, 2008]. Disponible en: http://www.ramsar.org/wff/key_wff_index.htm.

Reyes-Luz, M.I. 2006. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Ríos, R., Jansson, M., Zibuschka, F., Haberl 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. Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. México D. F. México.

Rodríguez-Cruz, A., Varela-Montellano, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 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). Master of Engineering. Universidad BOKU de Viena. Austria.

SEDUE. 1990. Programa Nacional para la Protección del Medio Ambiente 1990-1994. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Pp 65-66. México D.F. México.

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.

Winkler, M. 1986. Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ed. LIMUSA. 1ª Ed. México D.F. México.