

99



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Química

**DESARROLLO, SITUACION ACTUAL Y
APLICACIONES POTENCIALES DE LOS
HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
HORIZONTAL EN MEXICO**

**TRABAJO MONOGRAFICO DE
ACTUALIZACION**

**Que para obtener el título de:
INGENIERA QUIMICA**

p r e s e n t a:

MONICA MIRANDA RIOS



México, D.F.

2000



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: Prof.: Rosa María Ramírez Gama

VOCAL: Prof.: Rodolfo Torres Barrera

SECRETARIO: Prof.: Víctor Manuel Luna Pabello

1º SUPLENTE: Prof.: Humberto Rangel Davalos

2º SUPLENTE: Prof: Hilda Elizabeth Calderón Villagomez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

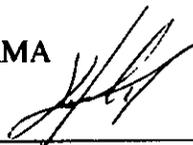
FACULTAD DE QUÍMICA DE LA UNAM, EDIFICIO "E" LABORATORIO 301,

BIBLIOTECAS DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA:

Dr. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

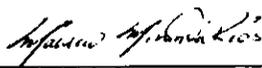
FIRMA



SUSTENTANTE:

MÓNICA MIRANDA RÍOS

FIRMA



DEDICATORIA

A mi madre Angela Y. Ríos Aguilar.
Luchadora incansable de sus sueños, gracias por todo tu apoyo, enseñarme a ser tenaz y buscar alcanzar la superación personal en base de trabajo y honradez.

A mi hermano Juan Miranda Ríos
El niño que me enseñó a jugar con el maravilloso mundo de la química y al hombre que siempre me ha apoyado.

A mis sobrinas Moni y Mariana
Por dejarme participar en su niñez y por recordarme lo maravilloso que es el mundo.

A mis abuelitos Juanita y José
Que desde el cielo me sonríen y cuidan

A mis Tías Tere y Bertha
Por su apoyo incondicional.

A mis primos y cuñada: Alejandra, Federico, Gerardo, Claudia y Araceli.
Por sus consejos, ayuda, los buenos ratos y las largas pláticas.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Víctor M. Luna Pabello, por su colaboración, asesoría, estímulo, valiosas sugerencias y gran apoyo en la dirección de esta tesis

A los miembros de mi jurado de tesis, por el interés y disposición de ayuda que mostraron por mi trabajo de tesis.

Al grupo Humedales: Sandra, Héctor, Jesús, Francisco y Juan Carlos por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias sobre los maravillosos "Humedales Artificiales"

A los compañeros del laboratorio 301 del PIQAYQA.

RECONOCIMIENTO:

A Conacyt por el apoyo recibido al otorgar la beca del proyecto 3302P-B 1997-1999. "Tratamiento de aguas residuales empleando sistemas de raíces en humedales", para la realización de esta tesis

CONTENIDO

PÁGINA

CAPITULO III: DESARROLLO Y SITUACIÓN ACTUAL DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL EN MÉXICO	42
3.1 SITUACIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO	42
3.2. METODOLOGÍA PARA LA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN MEXICO	42
3.2.1 BÚSQUEDA Y RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	43
3.2.1.1 CONSULTA EN MEDIOS ELECTRÓNICOS	43
3.2.2 CUESTIONARIO- ENCUESTA	44
3.2.3 OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	45
3.3 RESULTADOS DEL CUESTIONARIO ENCUESTA	45
3.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA	47
3.4.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN MÉXICO	47
3.5 LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS POR DUMAC	48
3.6 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA UNAM	48
3.6.1 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ENEP IZTACALA	49
3.6.2 ESTUDIOS REALIZADOS DENTRO DE LA FACULTAD DE QUÍMICA DE LA UNAM	49
3.7 ESTUDIOS REALIZADOS POR LA UAM	51
3.8 ESTUDIOS REALIZADOS POR UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ CHIHUAHUA	52
3.9 ESTUDIOS REALIZADOS POR EL INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS DE LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO	53
3.10 HUMEDALES CONSTRUIDOS POR EL INSTITUTO ESTATAL DEL AGUA EN OAXACA	54
3.11 RESULTADOS GLOBALES	65
CAPITULO IV. APLICACIONES POTENCIALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL EN MEXICO	67
4.1 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CON FINES EDUCATIVOS	67
4.2 APLICACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN COMUNIDADES SEMIURBANAS Y RURALES	67
4.3 APLICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES PARA MEJORAR EL EFLUENTE DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO YA EXISTENTES	70
4.4 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES.	71
4.5 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA INDUSTRIA PETROLERA	72

CONTENIDO

	PÁGINA
4.6 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES Y LOS LAGOS ARTIFICIALES	73
4.7 LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LAS CASAS HABITACIÓN.	73
4.8 PROPUESTA DE UNA MODIFICACIÓN A LOS SISTEMAS EXISTENTES DE HUMEDALES ARTIFICIALES	74
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXO 1: CUESTIONARIO- ENCUESTA. INVENTARIO SOBRE HUMEDALES ARTIFICIALES EN MÉXICO	87
ANEXO 2: MACROFITAS EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	92

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	PAGINA
TABLA 1. NOMBRES OTORGADOS A LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	7
TABLA 2. TIPO DE ECOTECNOLOGÍA Y PARÁMETROS AFECTADOS POR SU DISEÑO	9
TABLA 3. COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES LOGRADOS POR ECOTECNOLOGÍAS Y OTRAS TÉCNICAS DE TRATAMIENTO	9
TABLA 4. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS Y LAGUNARES CON RESPECTO A LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	11-13
TABLA 5. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE ALGUNAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A BASE DE HUMEDALES ARTIFICIALES	14
TABLA 6. DISTRIBUCIÓN TÍPICA PORCENTUAL DE COSTOS POR PARTIDA EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	15
TABLA 7. USOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES A TRAVÉS DE LA HISTORIA	19-20
TABLA 8. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES	23
TABLA 9. TABLA COMPARATIVA DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ENTRE HAFH, HAFV E HÍBRIDOS	39
TABLA 10. ECUACIONES DE DISEÑO PARA LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	40
TABLA 11. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL Y VERTICAL	41
TABLA 12. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE SOPORTE PARA LOS HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL	41
TABLA 13. SISTEMAS CONSTRUIDOS POR DUMAC	55
TABLA 14. SISTEMAS TIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADOS POR LA ENEP IZTACALA	56
TABLA 15. SISTEMA TIPO PLANTA A GRAN ESCALA DESARROLLADO POR LA ENEP IZTACALA	57
TABLA 16. SISTEMAS EXPERIMENTALES DESARROLLADOS POR LA FACULTAD DE QUÍMICA	58
TABLA 17. SISTEMAS PILOTO DESARROLLADOS POR LA FACULTAD DE QUÍMICA	59-60
TABLA 18. SISTEMAS EXPERIMENTALES DESARROLLADOS POR LA UAM	61
TABLA 19. SISTEMAS PILOTO DESARROLLADOS POR LA UAM	62
TABLA 20. SISTEMA PILOTO DESARROLLADO POR LA UACJ	63
TABLA 21. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE LA COMUNIDAD EL COPAL	64
TABLA 22. HUMEDALES ARTIFICIALES CONSTRUIDOS EN OAXACA	64

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	PAGINA
TABLA 23. FUNCIÓN DE LAS MACROFITAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	92-93
TABLA 24. IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS MACROFITAS EN LOS HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL, HAFH, HAFV Y SISTEMAS HÍBRIDOS	94
TABLA 25. CAPACIDAD DE TOMA DE NUTRIMENTOS DE ALGUNAS MACROFITAS EMPLEADAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	94

FIGURAS

FIGURA 1. HUMEDAL NATURAL	5
FIGURA 2. VISTA PARCIAL DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL UBICADO EN SANTA FE NUEVO MÉXICO, E.E.U.U.A..	6
FIGURA 3. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES	24
FIGURA 4. PROCESOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DE REMOCIÓN DE METALES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	26
FIGURA 5. MACROFITAS ACUÁTICAS DE HOJAS FLOTANTES Y LIBRE FLOTACIÓN	27
FIGURA 6. MACROFITAS ACUÁTICAS EMERGENTES	27
FIGURA 7. MACROFITAS ACUÁTICAS SUBEMERGENTES	28
FIGURA 8. SISTEMAS DE PLANTAS DE LIBRE FLOTACIÓN CON NENÚFARES EN LA SUPERFICIE	29
FIGURA 9. ESQUEMA MOSTRANDO LA DIFERENCIA ENTRE LOS HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL	29
FIGURA 10. SITIO HAYFIELD DENTRO DE LA PLANTA DE DEMOSTRACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN TRES RÍOS PHOENIX, CALIF. EEUUA	30
FIGURA 11. CORTE TRANSVERSAL DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL	32
FIGURA 12. CORTE TRANSVERSAL DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL	33
FIGURA 13. HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL CON ALIMENTACIÓN INVERSA	33
FIGURA 14. DOS DIFERENTES TIPOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS	34
FIGURA 15. DIBUJO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACROFITAS SUBEMERGENTES	35
FIGURA 16. SISTEMA HIPÓTETICO MULTITETAPA	36
FIGURA 17. VISTA POSTERIOR (a la izquierda) Y TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN (a la derecha) DE LA PLANTA PILOTO TIPO HAFH LOCALIZADA EN LOS VIVEROS DE COYOACÁN	51

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	PAGINA
FIGURA 18. DIAGRAMA MOSTRANDO AL HAFV QUE SE CONSTRUYE EN LA ZONA CULTURAL DE CIUDAD UNIVERSITARIA	51
FIGURA 19. VISTA POSTERIOR Y CORTE LONGITUDINAL DEL MÓDULO PILOTO Y DEL MÓDULO DE LABORATORIO CONSTRUIDOS POR LA UAM	52
FIGURA 20. FOTO DE UNO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CONSTRUIDOS EN OAXACA	54
FIGURA 21. ARREGLO HIPOTÉTICO A EMPLEAR EN LAS COMUNIDADES RURALES Y SEMIURBANAS	68
FIGURA 22. SECCIÓN LONGITUDINAL DE UN HAFH DONDE SE MUESTRA LA INSTALACIÓN DE PLANTAS DE ORNATO EN LA PARTE FINAL DEL TRATAMIENTO	69
FIGURA 23. LAGUNA DE OXIDACIÓN LOCALIZADA EN EL ESTADO DE MÉXICO	70
FIGURA 24. POSIBLE ARREGLO HAFH LAGUNA DE OXIDACIÓN	71
FIGURA 25. CASA HABITACIÓN DONDE SE MUESTRA EN PRIMER PLANO EL USO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL	73
FIGURA 26. PROPUESTA DE ARREGLO HAFV Y HAFH EN EL MISMO SISTEMA	74
FIGURA 27. ALGUNAS MACROFITAS DE HOJAS FLOTANTES Y LIBRE FLOTACIÓN EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL	95
FIGURA 28. CARRIZO (<i>Phragmites australis</i>)	96
FIGURA 29. TULE O ESPADAÑA (<i>Thypha latifolia</i>)	96
FIGURA 30. JUNCO (<i>Scirpus validus</i> y <i>Scirpus spp</i>)	96

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales por medio de los humedales artificiales se ha empleado por más de 20 años a nivel mundial. Sus ventajas con respecto a sistemas convencionales, en cuanto a bajos costos de construcción y operativos, requerimientos mínimos de personal capacitado, eficiencia en remoción de contaminantes y microorganismos, los han convertido en sistemas que no solamente han sido empleados para tratar las aguas residuales de pequeñas y medianas comunidades, si no que han sido utilizados para la depuración de aguas residuales de tipo industrial. Por tal motivo, este tipo de ecotecnología resulta altamente atractiva para ser aplicada en países en vías de desarrollo como México.

De acuerdo con los registros bibliográficos en México, el estudio y aplicación de este tipo de sistemas de tratamiento se empezó a realizar a finales de la década de los 80' en Nuevo León y, a principios de la década de los 90', dos instituciones de educación superior del Distrito Federal, la UNAM y la UAM, en las que de manera independiente, se empezaron a realizar algunos estudios a nivel laboratorio y planta piloto sobre los humedales artificiales de flujo horizontal. A pesar de ello, la información generada por estas investigaciones y las que se realizaron posteriormente en otras partes del país se encuentra muy dispersa, no es de fácil acceso ya que las publicaciones que se han realizado han sido muy pocas y, en ocasiones, la información proporcionada tanto en texto como en forma escrita es muy deficiente.

Es por ello que en esta tesis, se recabó la información disponible sobre los humedales artificiales de flujo horizontal que se han construido en México, tanto a escala de laboratorio y piloto como a escala real. El procedimiento seguido para la compilación de la información consistió en obtención de la bibliografía existente, en forma escrita y por medios electrónicos, así como de la realización y envío de un cuestionario a personas o instituciones que hayan estado involucradas en el estudio, construcción y operación de los humedales artificiales. La información recopilada permitirá en un futuro estructurar una base de datos que facilite la formulación de criterios de diseño propios para el país, a efecto de llevar a cabo la correcta apropiación de la tecnología, lo que eventualmente permitirá mejorar el funcionamiento de los sistemas ya existentes y servir como un mecanismo de propagación acertada de esa ecotecnología.

INTRODUCCION

La contaminación de las corrientes de agua se inició con la aparición de las primeras comunidades. Los seres humanos encontraron muy conveniente deshacerse de los materiales indeseables vaciándolos a las corrientes naturales de agua, porque estas los arrastran con gran rapidez y durante su camino a lagos o al mar eran purificadas por la naturaleza. No fue sino hasta la revolución industrial, cuando en los países desarrollados la contaminación aumentó en forma constante conforme la industria manufacturera creció y las comunidades se hicieron cada vez más grandes.

La sociedad moderna ha dado un uso intensivo al agua, de tal manera que cada persona produce actualmente más de 100 litros de agua contaminada diariamente, la cual al ser descargada en cuerpos receptores o en el mar aumenta los riesgos a la salud y disminuye la calidad de vida de la población, ya que sobrepasa la capacidad de la naturaleza para que el agua se autopurifique; de ahí la necesidad de remover los contaminantes antes de desechar las aguas residuales en cualquier sitio.

En los países en desarrollo, el rápido crecimiento de la población y lo limitado de sus recursos económicos ocasiona que el servicio de recolección, tratamiento y evacuación de las aguas residuales no sea suministrado al ritmo requerido; problema que se observa en las zonas rurales y también de las zonas densamente pobladas.

En México de los 231 m³/s de aguas residuales generadas, solamente el 15.3% son tratadas, descargándose al ambiente 196 m³/s sin tratamiento alguno. De los 808 sistemas de depuración existentes en el país, 193 se encuentran fuera de operación y solamente 133 trabajan con una eficiencia mayor al 75%. Esto le cuesta al país grandes daños en la salud pública y deterioro en el nivel de vida de la población y de su entorno. Para lograr una solución efectiva a estos problemas, se requiere la aplicación de tratamientos alternativos que sean sencillos en construcción, operación y mantenimiento, eficientes en sus niveles de remoción de contaminantes y económicos. Por lo que el tratamiento de las aguas residuales por medio de los sistemas de humedales artificiales surge como una alternativa que cumple las expectativas anteriores, además de ser estéticamente agradable (Ramírez, 1997, Luna Pabello et al., 1997).

El tratamiento de aguas residuales por medio de los humedales artificiales se ha empleado en el mundo por más de 20 años. Sus ventajas, con respecto a sistemas convencionales, son sus bajos costos de construcción y operación, así como requerimientos mínimos de personal capacitado. Además logra la remoción eficiente de contaminantes y microorganismos de origen entérico. Lo anterior hace de los humedales artificiales, sistemas que no solamente puedan ser empleados para tratar las aguas residuales de pequeñas y medianas comunidades, si no que se puedan utilizar para la depuración de aguas residuales de tipo industrial. Por tal motivo, este tipo de ecotecnología resulta altamente atractiva para ser implantada en países como México.

De acuerdo con los registros bibliográficos, en México el estudio y aplicación de este tipo de sistemas de tratamiento se empezó a realizar a finales de la década de los 80's en Nuevo León por DUMAC (Ducks Unlimited de México, A.C.). A principios de la década de los 90's, dos instituciones de educación superior del Distrito Federal, la UNAM y la UAM, de manera independiente, empezaron a realizar algunos estudios a nivel laboratorio y planta piloto sobre los humedales artificiales de flujo horizontal. A pesar de ello, la información generada por estas investigaciones y las que se realizaron posteriormente en otras partes del país por otras instancias universitarias y gubernamentales, se encuentra muy dispersa, no es de fácil acceso, o no se ha publicado. De las pocas publicaciones existentes sobre los avances realizados al respecto se puede observar que en general el manejo de la información proporcionada es difusa y deficiente.

Por lo anterior, en el presente trabajo se busca recopilar la mayor cantidad posible de información disponible, sobre los humedales artificiales construidos en México, para que en un futuro se pueda estructurar una base de datos que facilite la formulación de criterios de diseño propios para el país, a efecto de llevar a cabo la correcta apropiación de la ecotecnología, lo que eventualmente permitirá mejorar el funcionamiento de los sistemas ya existentes y servir como un mecanismo de propagación acertada. Para ello se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

- Revisar en textos impresos y por medios electrónicos el desarrollo histórico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en humedales artificiales.
- Describir las principales características funcionales de los humedales artificiales.
- Diferenciar los tipos de humedales artificiales existentes
- Realizar y distribuir un cuestionario- encuesta para recabar información sobre los sistemas de humedales artificiales en el país, a cualquier nivel que han sido construidos y se encuentren o no en funcionamiento.
- Recopilar bibliográficamente la información generada sobre el desarrollo de los humedales artificiales en México.
- Evaluar las aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en el país.

Para cumplir con los objetivos, la estrategia planteada fue la siguiente:

- 1) Recopilación y análisis de la información generada en medios impresos y electrónicos en el ámbito mundial sobre los humedales artificiales. Las principales fuentes de información fueron revistas, memorias de congresos, libros, tesis, páginas de Internet y un disco compacto que contiene referencias bibliográficas sobre los humedales artificiales en el mundo.
- 2) Para obtener la información de los humedales que se han construidos en el país tanto a escala de laboratorio y piloto, así como a escala real, además de realizar la búsqueda bibliográfica en los medios citados en el punto uno, se realizó un cuestionario- encuesta,

De acuerdo con los registros bibliográficos, en México el estudio y aplicación de este tipo de sistemas de tratamiento se empezó a realizar a finales de la década de los 80's en Nuevo León por DUMAC (Ducks Unlimited de México, A.C.). A principios de la década de los 90's, dos instituciones de educación superior del Distrito Federal, la UNAM y la UAM, de manera independiente, empezaron a realizar algunos estudios a nivel laboratorio y planta piloto sobre los humedales artificiales de flujo horizontal. A pesar de ello, la información generada por estas investigaciones y las que se realizaron posteriormente en otras partes del país por otras instancias universitarias y gubernamentales, se encuentra muy dispersa, no es de fácil acceso, o no se ha publicado. De las pocas publicaciones existentes sobre los avances realizados al respecto se puede observar que en general el manejo de la información proporcionada es difusa y deficiente.

Por lo anterior, en el presente trabajo se busca recopilar la mayor cantidad posible de información disponible, sobre los humedales artificiales construidos en México, para que en un futuro se pueda estructurar una base de datos que facilite la formulación de criterios de diseño propios para el país, a efecto de llevar a cabo la correcta apropiación de la ecotecnología, lo que eventualmente permitirá mejorar el funcionamiento de los sistemas ya existentes y servir como un mecanismo de propagación acertada. Para ello se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

- Revisar en textos impresos y por medios electrónicos el desarrollo histórico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en humedales artificiales.
- Describir las principales características funcionales de los humedales artificiales.
- Diferenciar los tipos de humedales artificiales existentes
- Realizar y distribuir un cuestionario- encuesta para recabar información sobre los sistemas de humedales artificiales en el país, a cualquier nivel que han sido construidos y se encuentren o no en funcionamiento.
- Recopilar bibliográficamente la información generada sobre el desarrollo de los humedales artificiales en México.
- Evaluar las aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en el país.

Para cumplir con los objetivos, la estrategia planteada fue la siguiente:

- 1) Recopilación y análisis de la información generada en medios impresos y electrónicos en el ámbito mundial sobre los humedales artificiales. Las principales fuentes de información fueron revistas, memorias de congresos, libros, tesis, páginas de Internet y un disco compacto que contiene referencias bibliográficas sobre los humedales artificiales en el mundo.
- 2) Para obtener la información de los humedales que se han construidos en el país tanto a escala de laboratorio y piloto, así como a escala real, además de realizar la búsqueda bibliográfica en los medios citados en el punto uno, se realizó un cuestionario- encuesta,

que se envió a las personas que están o han estado involucradas en el estudio, construcción y operación de los sistemas de humedales artificiales.

El análisis de la información recopilada dio como resultado que los estudios y la construcción de los humedales se ha dirigido principalmente a los humedales subsuperficiales de flujo horizontal. En el caso de los humedales de flujo vertical, solamente se reporta la existencia de un sistema ubicado en la UNAM, pero que todavía no entra en funcionamiento.

En cuanto al tipo de agua residual que se ha alimentado, la mayoría de los sistemas tratan aguas residuales de tipo doméstico; solamente dos sistemas manejan aguas de tipo industrial, el sistema a gran escala que se construyó para tratar las aguas residuales generadas por el rastro de Pachuca, y el sistema experimental diseñado para tratar las aguas residuales provenientes del procesado del maíz construido en la UNAM.

A más de 10 años de haberse construido el primer humedal artificial en México, y conociendo sus bondades, no ha ocurrido la aceptación esperada de este tipo de ecotecnologías. Lo anterior probablemente se debe a los problemas operativos presentes en algunos sistemas que no han sido construidos y operados adecuadamente, lo cual ha originado desconfianza en su implementación. Esto aunado a la poca difusión de la información existente sobre otros sistemas que si han funcionado adecuadamente, puede ser el motivo de la relativa mala fama de los humedales artificiales, en algunos sectores que inciden en la toma de decisiones para la selección de tratamientos de aguas residuales a nivel nacional.

CAPITULO I: LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ECOTECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La tendencia actual en el tratamiento de las aguas residuales es hacia el uso de tecnologías o ecotecnologías, que utilicen o imiten a la naturaleza. Para ello se aprovechan algunos componentes del ambiente como plantas, microorganismos y suelo, para depurar los contaminantes presentes en las aguas residuales. En este sentido, los humedales artificiales, tema de esta tesis, no obstante la intervención que el ser humano hace para su construcción, han sido catalogados dentro de los denominados “sistemas naturales” de tratamiento, por lo que forman parte de estas nuevas ecotecnologías (Bastian y Hammer, 1993).

En el presente capítulo se define lo que es un humedal natural y un humedal artificial y se realiza una comparación con respecto a otras ecotecnologías y sistemas convencionales. Asimismo, se describe lo concerniente a su desarrollo histórico.

1.1 DEFINICIÓN DE HUMEDAL NATURAL Y ARTIFICIAL

Se denomina Humedal a todas aquellas áreas que se encuentran inundadas por aguas dulces o saladas, temporal o permanentemente y que presentan una vegetación típica adaptada para vivir en condiciones de suelo saturado. Son sistemas de transición entre zonas terrestres y acuáticas. Los humedales pueden ser naturales o artificiales (Hammer; 1993; Bastian et al., 1993; Gelt, 1997, Vymazal, 1998; EPA, 1999). Dentro de la clasificación de humedales naturales se encuentran los pantanos, marismas, ciénagas, esteros, manglares, etc. La figura 1 muestra una vista parcial de un humedal natural, en la que se observan aves nadando sobre el agua y la vegetación típica.



FIGURA 1. HUMEDAL NATURAL (Fuente: Dugan, 1993)

HUMEDAL ARTIFICIAL O CONSTRUIDO (HA)

Los humedales artificiales o construidos son sistemas específicamente diseñados y construidos por el hombre para tratar las aguas residuales, en estos se aumenta la capacidad depuradora o eficiencia de tratamiento mediante la optimización de los procesos físicos, químicos y biológicos (producción de biomasa) que ocurren en los ecosistemas de humedales naturales (Gray, 1989; Hammer y Bastian, 1989; Schaller, 1998; Vymazal, 1998). Los humedales artificiales son sistemas complejos e integrados, en los que el agua, las plantas, animales, microorganismos y ambiente (sol, aire y suelo) interactúan para tratar aguas contaminadas (Gelt, 1997). En la figura 2 se muestra un humedal artificial construido en Santa Fe Nuevo México, Estados Unidos, para tratar 1500 galones por día de agua residual; se aprecia como se combina con el paisaje pasando prácticamente desapercibido (Taylor et al, 1998). Precisamente esta característica los hace atractivos de instalar, ya que son estéticamente agradables (Luna-Pabello et al., 1997a).

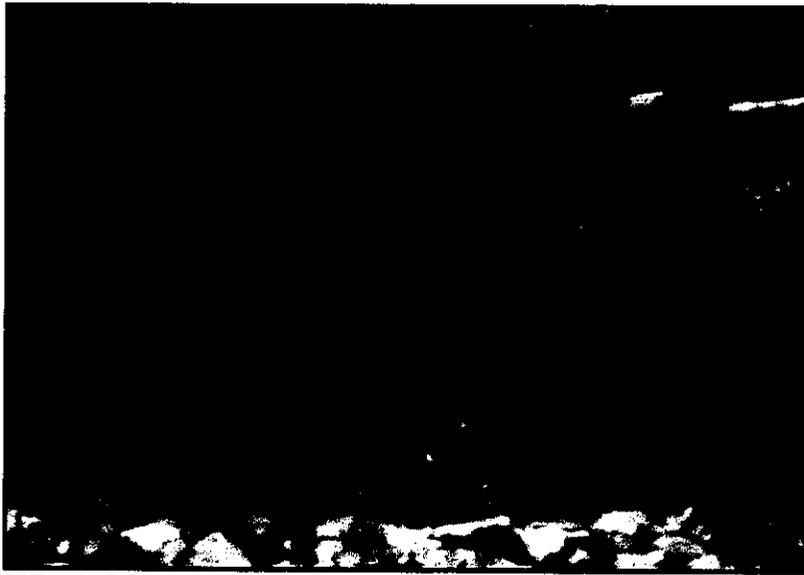


FIGURA 2. VISTA PARCIAL DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL UBICADO EN SANTA FE, NUEVO MEXICO, E.E.U.U.A. (Fuente: Taylor et al, 1998)

Existe una extensa bibliografía sobre los humedales artificiales, pero aún no se ha llegado a un consenso, en los diferentes países en los que se aplica esta ecotecnología, sobre como nombrarlos. Haberl (1999), al respecto comenta que al parecer nunca terminará la discusión sobre otorgarles un nombre. En la tabla 1, se encuentra una recopilación de los principales nombres utilizados en diferentes países e idiomas (Wolverton, 1986; Hammer y Bastian, 1989; Staubitz y Surface, 1989; Watson, 1989; Wieder et al., 1989; Collado, 1992; Reed y Brown, 1992; Rico et al, 1992; Börner, 1992; Brix, 1993; Rivera y Calderón, 1993; Kreiner, 1995; Zachritz y Lundie, 1995; Gillete, 1996 a; Gillete, 1996b; Schiller, 1996; Collí, 1997; Haberl, 1997 y 1999; IMTA, 1997; Luna-Pabello, 1997; Luján, 1997; Rivas, 1997; Foidl, 1998, Lopez-G, 1999).

TABLA 1. NOMBRES OTORGADOS A LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

IDIOMA	NOMBRE	PAIS DONDE SE APLICA
ALEMÁN	PFLANZENKLÄRANLAGEN WURZELRAUMENTSORGUNG BODEN-PFLANZENFILTER HYDROBOTANISCHE ABWASSERREINIGUNG	ALEMANIA AUSTRIA
INGLÉS.	ROOT ZONE SYSTEM o METHOD (RZM) ACUATIC PLANT SYSTEMS ARTIFICIAL MARSHLAND TREATMENT SYSTEMS ARTIFICIAL MARSHES FILTER BIOLOGICAL MACROPHYTIC MARSH BEDS HYDROBOTANICAL SYSTEMS REED BED TREATMENT ROCK PLANT WASTEWATER FILTER ROCK REED FILTER SYSTEM (RRF) GRAVEL O ROCK FILLED TRENCHES SOIL FILTER TRENCH MICROBIAL ROCK FILTER VEGETATED SUBMERGED BED (VSB) ARTIFICIAL WETLANDS CONSTRUCTED WETLANDS CREATED WETLANDS ENGINEERED WETLANDS MAN-MADE WETLANDS URBAN WETLANDS TREATMENT WETLANDS WETLAND SYSTEMS	REINO UNIDO, ESTADOS UNIDOS Publicaciones en el idioma inglés en Europa y Norteamérica.
FRANCÉS	MARAIIS RECONSTITUÉS	FRANCIA
ESPAÑOL	LECHOS DE JUNCOS TERRENOS PANTANOSOS ARTIFICIALES TRATAMIENTO CON FILTROS FITO TERRESTRE TRATAMIENTO CON MACROFITAS SISTEMAS RADICULARES ESTEROS ARTIFICIALES BIOFILTRO SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LECHOS DE RAICES METODO DE LA ZONA DE RAIZ O LA RIZOSFERA FILTRO BIOLÓGICO FILTRO DE SUELO CON PLANTAS FILTROS DE TIERRAS HÚMEDAS FILTRO MICROBIANO DE ROCAS Y PLANTAS LECHOS DE PLANTAS ACUATICAS (LPA) LECHO DE HIDROFITAS SISTEMAS DE SUELO CON PLANTAS SISTEMAS DE LECHOS INUNDADOS DE SUELO CON PLANTAS PANTANOS URBANOS PANTANO ARTIFICIAL O CONSTRUIDO HUMEDALES CONSTRUIDOS FILTROS HORIZONTALES DE GRAVA Y GRAVILLA HUMEDALES ARTIFICIALES O CONSTRUIDOS	ESPAÑA, ARGENTINA, PERÚ, NICARAGUA MÉXICO

1.2 ECOTECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales son diseñados para aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren normalmente en la naturaleza, al interaccionar el agua, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera (Metcalf y Eddy, 1996). Estos procesos son:

- Físicos: sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico.
- Químicos: precipitación química, óxido-reducción.
- Biológicos: descomposición biológica, fotosíntesis, fotooxidación, y asimilación de compuestos por parte de plantas.

Es común denominar a los procesos físicos y químicos como tratamiento primario y a los biológicos como de tipo secundario.

Los procesos que intervienen en el tratamiento secundario tienen como objetivo remover la materia orgánica coloidal y soluble por medio de procesos biológicos aerobios o anaerobios. Como se mencionó anteriormente, en el caso de los sistemas naturales se aprovechan los componentes del ambiente como son plantas, microorganismos y suelo, por lo que también se les ha denominado ecotecnologías.

De manera particular en función de su disposición, las ecotecnologías para el tratamiento de las aguas residuales a la vez se subdividen en: sistemas acuáticos y sistemas de aplicación al terreno (Bastian y Hammer, 1993; Metcalf y Eddy 1996; Kreiner, 1995; Schiller, 1996).

a) **Sistemas acuáticos:**

Son las lagunas de estabilización, las lagunas con plantas flotantes, áreas inundadas con plantas flotantes, humedales naturales y humedales artificiales de flujo superficial.

b) **Sistemas basados en suelo o de aplicación al mismo.**

Son los sistemas superficiales de tasa lenta, infiltración rápida, de riego (o filtro verde), escorrentía o flujo superficial y humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Cada uno de los sistemas anteriores, presenta diferentes parámetros de diseño que limitan su capacidad para degradar los contaminantes presentes en el agua residual. Los principales parámetros afectados que se deben considerar al momento de diseñar las ecotecnologías se resumen en la tabla 2 (Kreiner, 1995).

TABLA 2. TIPO DE ECOTECNOLOGÍAS Y PARÁMETROS AFECTADOS POR SU DISEÑO (Fuente: Kreiner, 1995).

TIPO DE SISTEMA	PARÁMETRO AFECTADO
Tasa lenta	Capacidad hidráulica, Nitrógeno y Fósforo
Infiltración rápida	Capacidad hidráulica, Nitrógeno y Fósforo
Flujo superficial	Remoción de DBO, Sólidos solubles y a veces Nitrógeno
Sistemas de lagunas	Remoción de DBO, Sólidos solubles y a veces Nitrógeno
Sistemas lagunares con plantas flotantes Lirio acuático como tratamiento secundario Lirio acuático como tratamiento secundario	Remoción de DBO y Sólidos solubles Remoción de DBO, Sólidos solubles, Nitrógeno y Fósforo
Áreas inundadas con plantas emergentes Humedales naturales.	Remoción de DBO, Sólidos solubles, Nitrógeno, Fósforo y metales.
Áreas inundadas con plantas emergentes (artificiales) Humedales artificiales de flujo superficial. Humedales artificiales de flujo subsuperficial	Remoción de DBO, Sólidos solubles y Nitrógeno Remoción de DBO, Sólidos solubles, Nitrógeno, Fósforo y metales

Para tener una estimación aproximada sobre las posibilidades de tratamiento de las ecotecnologías, en la tabla 3, se comparan los porcentajes de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales de tipo doméstico, con respecto a otras técnicas mecánicas, químicas y biológicas de tratamiento de aguas residuales llamadas comúnmente convencionales (Collado, 1992; Schiller, 1996; IMTA, 1997).

TABLA 3. COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES LOGRADOS POR ECOTECNOLOGÍAS Y OTRAS TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

TIPO DE TRATAMIENTO	REDUCCIÓN EN %		
	DBO	Sólidos	Bacterias
TRATAMIENTO CONVENCIONAL			
Tamices finos	5-10	5-20	10-20
Clorinación de desagües decantados	15-30	-	90-95
Pileta de decantación	25-40	40-70	25-75
Pileta de floculación	40-50	50-70	-
Pileta de floculación química	50-85	70-90	40-80
Lecho percolador (carga alta)	65-90	65-92	70-90
Lecho percolador (carga baja)	80-95	70-92	90-95
Lodos activados (carga alta)	50-70	80	70-90
Lodos activados (carga baja)	85-90	85-90	90-98
Clorinación de desagües biológicamente tratados	-	-	98-99
Biodiscos	92	90	9
ECOTECNOLOGIAS			
Lagunas de oxidación	72	77	99.9
Riego	95-98	95-99	99
Infiltración rápida	90-95	95-98	98-99
Escorrentía superficial	85-90	80-90	80-98
Filtros de suelos	90-95	85-90	95-99.9
Humedales artificiales	90-95	85-90	98-99.9

Es importante señalar que una de las principales diferencias entre las ecotecnologías y los sistemas convencionales es la fuente de energía utilizada. Aunque las ecotecnologías requieren de la misma cantidad de energía, por cada kilogramo de contaminante a remover, que los sistemas convencionales, las ecotecnologías emplean fundamentalmente fuentes renovables de energía, mientras que los sistemas convencionales utilizan generalmente fuentes de energía no renovables. Asimismo, las ecotecnologías se distinguen por hacer uso intensivo del terreno, mientras que los sistemas convencionales lo hacen por su uso intensivo de la energía (Metcalf y Eddy, 1996).

1.3 COMPARACION DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CON OTROS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Los humedales artificiales son sistemas que presentan grandes ventajas técnicas, económicas, sociales y estéticas sobre otros sistemas de tratamiento de aguas residuales. La operación adecuada de los sistemas asegura que el agua tratada tenga una calidad acorde con los requerimientos establecidos por la normatividad ambiental nacional vigente, con características ideales para ser utilizada en riego y en la que se eliminan inclusive microorganismos patógenos (Luna Pabello et al., 1997; Millán-Hernández, 2000; Rivera et al., 1995).

Los costos de inversión son menores comparados con los costos de los sistemas de tratamiento tradicionales. De igual forma, los costos de operación resultan menores, pues dichos sistemas tienen un largo período de vida útil (25 años) y operan con requerimientos energéticos mínimos dado que la conducción del agua a tratar se realiza prácticamente por gravedad, la cual se induce por diferencias en las pendientes por donde fluye el agua (Green y Upton 1995; Reed y Brown, 1992). Dadas las características intrínsecas a la construcción de este tipo de sistemas, no es fácil que sufran desequilibrios por cambios en la concentración de contaminantes y aumento o disminución brusca del flujo del agua suministrada (naturalmente, descartando la introducción accidental de compuestos tóxicos). Cabe señalar que existen reportes favorables sobre la respuesta observada en humedales artificiales cuando han sido alimentados (previa adaptación gradual al compuesto problema) con aguas que contienen detergentes, materiales tóxicos y/o metales pesados, no obstante la investigación al respecto es incipiente.

A pesar de las bondades que ofrecen los sistemas de tratamiento basados en humedales artificiales, en México no han sido vistos de manera seria, por lo que su implementación es prácticamente nula, en tanto que los sistemas de lodos activados y del tipo de lagunas de estabilización son los más ampliamente utilizados (García y Romero, 1997). Considerando lo anterior en la tabla 4 se presenta la comparación de los principales aspectos económicos, técnicos y estéticos que involucran tanto la construcción como la operación de esos tres sistemas. Una de las primeras preguntas que surge al hablar sobre los humedales artificiales es ¿a cuánto asciende la inversión monetaria involucrada en su construcción y mantenimiento?, por lo que en la tabla 5, se presentan algunos costos reportados en la bibliografía sobre sistemas que se encuentran en operación y como información complementaria, en la tabla 6 se presenta la distribución porcentual de los diferentes insumos que involucra la construcción.

TABLA 4. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS Y LAGUNARES CON RESPECTO A LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

	SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS	SISTEMAS LAGUNARES	HUMEDALES ARTIFICIALES
COSTOS DE CONSTRUCCION	<p>GENERADOS POR LA TECNOLOGÍA, SISTEMAS DE CONTROL OPERACIONAL Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS NECESARIOS (Röthlisberger, 1996).</p> <p>DE \$1.46 A \$1.75 USD POR MILES DE GALONES PARA GRANDES CIUDADES EN GENERAL DE \$2.50 A \$3.00 USD POR MILES DE GALONES (Gillete, 1996)</p>	<p>GENERADOS POR LA EXCAVACIÓN Y REVESTIMIENTO DE LOS TALUDES DE LAS PAREDES QUE LOS FORMAN (Foidl, 1997)</p>	<p>EQUIVALENTES A LOS OCASIONADOS POR LA REMODELACIÓN DE PLANTAS CONVENCIONALES. EN <u>SISTEMAS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL</u> DEL 25 A 75% DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL (Cooper y Boon, 1986) \$0.10 A \$0.15 POR MILES DE GALONES (Gillete, 1996)</p> <p>EN <u>SISTEMAS DE FLUJO SUPERFICIAL</u>: DEL 10 AL 50% DEL COSTO DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL (Hammer, 1993)</p>
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	<p>COSTO INTENSIVO QUE SE INCREMENTA CONSTANTEMENTE POR EL AUMENTO DE SUELDOS DEL PERSONAL, COSTOS GENERADOS POR EL CONSUMO DE REACTIVOS Y ENERGÍA Y LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS (Röthlisberger, 1996).</p>	<p>BAJO COSTO DE OPERACION Y DE MANTENIMIENTO (Moreno, 1991)</p>	<p>BAJO COSTOS QUE PERMANECEN ESTABLES CON EL PASO DEL TIEMPO CORRESPONDEN APROXIMADAMENTE DEL 10 AL 25% DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL (Cooper y Boon, 1986) PARA HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL PUEDE SER DE \$50 A \$60 USD Ha/AÑO</p>
REQUERIMIENTOS DE TERRENO POR p. e.	<p>0.5 A 1.5 m² (Röthlisberger, 1996).</p>	<p>2,0 A 2,5 m² (Foidl, 1997)</p>	<p>DESDE 1.5 m² (EN PAISES LATINOAMERICANOS) A 6 m² (EN EUROPA Y NORTEAMERICA) (Foidl, 1997; Haberl, 1997)</p>
DRENAJE	<p>CENTRALIZADO COLECTORES LARGOS HACIA LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO. EL AGUA TRATADA ES DESCARGADA A RÍOS O CORRIENTES DE AGUA LEJANOS DEL LUGAR DONDE SE GENERÓ LO QUE PROVOCA QUE EL AGUA SUBTERRÁNEA NO SEA REGENERADA (Röthlisberger, 1996).</p>	<p>CENTRALIZADO SE REQUIERE UBICAR LOS SISTEMAS LAGUNARES A CIERTA DISTANCIA CON RESPECTO A LAS ZONAS POBLADAS (Foidl, 1997)</p>	<p>DESCENTRALIZADO AUNQUE TAMBIÉN PUEDE SER CENTRALIZADO. COLECTORES CORTOS. NO REQUIERE SER UBICADO A UNA DISTANCIA MÍNIMA RESPECTO DE LAS ÁREAS POBLADAS. EL AGUA TRATADA PERMANECE EN LA REGIÓN (Röthlisberger, 1996; Foidl, 1997).</p>
INTEGRACION AL PAISAJE	<p>CUERPOS EXTRAÑOS AL PAISAJE, GRAN CANTIDAD DE CEMENTO, ACERO Y SUPERFICIES SECAS. RUIDOS EXTRAÑOS PROVENIENTES DEL SISTEMA (Röthlisberger, 1996).</p>	<p>PRESENCIA DE MATERIA EN SUSPENSIÓN EN EL EFLUENTE COMO SON ALGAS Y FITOPLANCTON (Moreno, 1991). PRESENCIA DE MOSQUITOS Y MALOS OLORES (Foidl, 1998)</p>	<p>CERCANO A LO NATURAL. ESTÉTICAMENTE AGRADABLES SANTUARIO PARA AVES, INSECTOS Y PEQUEÑAS FORMAS DE VIDA (Röthlisberger, 1996).</p>

CONTINUACIÓN.....

TABLA 4. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS Y LAGUNARES CON RESPECTO A LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

	SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS	SISTEMAS LAGUNARES	HUMEDALES ARTIFICIALES
EVAPORACION DEL AGUA RESIDUAL	EVAPORACIÓN NEGATIVA YA QUE LA PRECIPITACIÓN A LOS ESTANQUES DE TRATAMIENTO ES MAYOR QUE EL AGUA EVAPORADA (Röthlisberger, 1996).	PERDIDAS CONSIDERABLES DE AGUA POR EVAPORACIÓN, LO QUE OCASIONA LA SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS Y EN CONSECUENCIA NO SE PUEDE UTILIZAR COMO AGUA DE RIEGO (Moreno, 1991)	ALTA EVAPORACIÓN EN LAS HOJAS Y TALLOS DE LAS PLANTAS POR LO QUE PARTE DEL AGUA RESIDUAL SE EVAPORA AYUDANDO AL MICROCLIMA DEL SISTEMA. EN CLIMAS MODERADOS LA PRECIPITACIÓN ES DE 110 cm/año Y LA EVAPORACIÓN PUEDE LLEGAR A SER DE 160 A 180 cm/año (Röthlisberger, 1996).
CONSUMO DE ENERGÍA	GRAN CONSUMO DE ENERGÍA POR LOS DIFERENTES EQUIPOS INVOLUCRADOS (Metcalf y Eddy, 1996; Röthlisberger, 1996).	NECESITA LUZ SOLAR Y LA ACCIÓN DEL VIENTO PARA SU CORRECTO FUNCIONAMIENTO POR LO QUE LA EFICIENCIA DE PURIFICACIÓN VARÍA DE VERANO A INVIERNO (Moreno, 1991)	MENOR CONSUMO DE ENERGÍA. NO LE AFECTA LOS CAMBIOS DE CLIMA Y EL OXÍGENO ES ADMINISTRADO POR LAS PLANTAS (Röthlisberger, 1996). LA EFICIENCIA DE PURIFICACIÓN NO VARÍA CON EL CLIMA.
ADAPTABILIDAD A VARIACIONES	POCO ADAPTABLE (ESPECIALMENTE EL PASO BIOLÓGICO) A CAMBIOS EN LA CONCENTRACIÓN Y CONSISTENCIA DEL AGUA RESIDUAL (Röthlisberger, 1996).	FLEXIBILIDAD EN EL TRATAMIENTO DE PUNTAS DE CARGA Y CAUDAL POR PERIODOS CORTOS (Moreno, 1991)	NO LE AFECTA GRAN ADAPTABILIDAD GENERADA POR LA COMPLEJA INTERRELACIÓN DEL SUELO, BACTERIAS, AGUA Y OXÍGENO (Röthlisberger, 1996).
TIEMPO DE DEMANDA DE TRABAJO	MUY ALTO, SE REQUIERE DE UN MONITOREO CONSTANTE (Röthlisberger, 1996).	MENOR QUE EN EL TRATAMIENTO CONVENCIONAL PERO MAYOR QUE EN LOS HUMEDALES (Moreno, 1991).	BAJO NO SE NECESITA UN MONITOREO CONSTANTE APROXIMADAMENTE DE 1 A 8 HORAS POR SEMANA (Röthlisberger, 1996).
LODOS	SE GENERA DOBLE CANTIDAD DE LODOS QUE EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES. ESTO ES PORQUE EN EL PASO BIOLÓGICO SOLO SE DEGRADA EL 45% DE LA CARGA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL POR LO QUE PARA OBTENER EL 90%, EL REMANENTE ES REMOVIDO EN FORMA DE LODOS (Röthlisberger, 1996).	LOS LODOS GENERADOS SE VAN ACUMULANDO EN EL FONDO DE LA LAGUNA (Moreno, 1991).	SOLO SE GENERAN LODOS PRIMARIOS QUE SON DEGRADADOS FÁCILMENTE POR MICROORGANISMOS. NO SE REQUIERE INTRODUCIR OXÍGENO, TORRES DE LODOS, DRENAJES TÉCNICOS O PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN DE LODOS (Röthlisberger, 1996).

CONTINUACIÓN.....

TABLA 4. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS Y LAGUNARES CON RESPECTO A LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

	SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS	SISTEMAS LAGUNARES	HUMEDALES ARTIFICIALES
DISPOSICIÓN DE LOS LODOS	<p>LA DISPOSICIÓN SE REALIZA POR TRES MÉTODOS :</p> <p>1) COLOCACIÓN EN DEPOSITOS.</p> <p>2) APLICACIÓN EN LA AGRICULTURA. ORIGINANDO LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS POR METALES PESADOS Y AGENTES ACTIVOS INDUSTRIALES. ESTOS A LA VEZ CONTAMINAN LOS ALIMENTOS Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS POR LO QUE OCASIONAN COSTOS EN EL SECTOR DE SALUD PÚBLICA Y LA REDUCCIÓN DEL ESPACIO PARA LA SIEMBRA.</p> <p>3) QUEMA DE LOS LODOS</p>	<p>LA GENERACIÓN DE LODOS TIENE LUGAR EN MAYOR PROPORCIÓN EN LAS LAGUNAS ANAEROBIAS. EN ESTAS SE ACUMULAN LOS LODOS POR UN PERIODO DE 3 A 6 AÑOS ANTES DE QUE SEA NECESARIO SU VACIADO Y LIMPIEZA.</p> <p>DEBIDO AL LARGO PERÍODO DE ALMACENAMIENTO LOS LODOS RESULTANTES PRESENTAN UN ALTO GRADO DE MINERALIZACIÓN DEL 80 AL 85% (Moreno, 1991).</p>	<p>SOLO SE GENERAN LODOS EN EL TRATAMIENTO PRIMARIO LOS CUALES PUEDEN SER DEPOSITADOS EN UNA PILETA DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA DE CANTERA CON UN CANAL DE DESAGÜE HACIA EL HUMEDAL. EL LODO SE PUEDE ALMACENAR POR UN AÑO OBTENIÉNDOSE UNA BUENA DESCOMPOSICIÓN Y ESTABILIZACIÓN DEL MISMO (Foidl, 1997)</p> <p>EXISTE LA POSIBILIDAD DE UNIR EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL CRUDA Y LA DE LOS LODOS EN EL MISMO SISTEMA.</p>

TABLA 5. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE ALGUNAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A BASE DE HUMEDALES ARTIFICIALES

TIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL	TIPO DE AGUA RESIDUAL	TIPO DE TRATAMIENTO	COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL HUMEDAL	COSTO DE UN SISTEMA CONVENCIONAL	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO	UBICACIÓN
FLUJO SUPERFICIAL	PORCICOLA (500 PUERCOS)	SECUNDARIO	\$260,000.00 USD	\$2.5 MILLONES USD	1986	N.D.	BENTON KENTUCKY, USA (Hammer, 1993)
FLUJO SUPERFICIAL	DOMÉSTICA (500 p. e.)	SECUNDARIO	\$212,000.00 USD	N.D.	N.D.	<\$10,000.00 USD	HARDIN, USA (Hammer, 1993)
FLUJO SUPERFICIAL	DOMÉSTICA (1,000 p. e.)	TERCIARIO	\$10,000.00 USD	N.D.	N.D.	<\$10,000.00 USD	PEMBROKE, USA (Hammer, 1993)
FLUJO SUPERFICIAL	AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UNA REFINERIA	TERCIARIO	\$250,000.00 USD	DE 1 A 3 MILLONES (1972 USD)	1975	ND	MANDAN, NORTH DAKOTA USA (Lichtfield, 1993)
FLUJO SUPERFICIAL	DRENAJE DE UNA MINA	N.D.	\$28,000.00 USD EQUIVALENTE AL COSTO ANUAL DE QUIMICOS DE UN SISTEMA CONVENCIONAL	N.D.	1988	<\$500.00 USD	VALLE DE TENNESSE, USA (Hammer, 1993)
FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL	DOMÉSTICA (APROX. 1,000 p. e.)	SECUNDARIO	\$35,000.00 USD	\$40,000.00 A \$70,000.00 USD (LAGUNAS DE OXIDACIÓN) \$200,000.00 A \$ 400,000.00 USD (LODOS ACTIVADOS O FILTROS PECOLADORES)	1996	N.D.	MASAYA, NICARAGUA. (Foidl, 1997 y 1998)
FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL	DOMÉSTICAS (330 mm/día)	SECUNDARIO	R 3,368,000.00	R 2,708,000.00 (LODOS ACTIVADOS)	1986	R 101,300.00 VS R 453,000.00	SOUTH AFRICA (Batchelor y Loots, 1997)
COMBINACIÓN DE HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL CON FLUJO SUBSUPERFICIAL	LIXIVIADOS DE CENIZAS DE LA PLANTA DE ENERGÍA ALLEGHENY (REMOCIÓN DE Fe Y Mn)	SECUNDARIO Y TERCIARIO	\$2.5 MILLONES USD (COSTO TOTAL EN LOS PROXIMOS 50 AÑOS)	\$4.8 A \$8.8 MILLONES USD	1995	SE CONSIDERÓ CON EL COSTO DE CONSTRUCCIÓN	SPRINGDALE PENN. U.S.A. (Powicki, 1997)

(N. D. No se reporta el dato, p. e.: Persona equivalente, R= rand, moneda Sudáfricana)

1.4 ASPECTOS HISTÓRICOS SOBRE HUMEDALES

Los humedales naturales, han sido utilizados por la humanidad durante siglos como receptáculos de sus aguas residuales debido a su cercanía a los ríos o corrientes de agua y no porque fueran conocidas sus propiedades para el tratamiento de aguas residuales. De hecho eran considerados lugares inhóspitos, llenos de alimañas peligrosas y fuente de enfermedades, cuyo mejor fin era desecarlos y utilizarlos para otros propósitos, tales como labores agrícolas o zonas habitacionales y, no fue sino hasta hace algunas décadas que se identificó su importancia económica para los ecosistemas y su participación en el mejoramiento de la calidad del agua residual (Hantzche, 1985, Mitsch y Gosselink, 1986; Sereico y Larneo, 1988; Serio, 1998; Vymazal, 1998). Los humedales naturales proveen un tratamiento efectivo para diferentes tipos de aguas contaminadas. Pueden remover, convertir o acumular grandes cantidades de contaminantes como son: materia orgánica, sólidos suspendidos, exceso de nutrimentos y metales de efluentes tanto de origen municipal como industrial, agrícola o metalúrgico (Hammer y Bastian, 1989). A pesar de estas características para su utilización se deben considerar los siguientes aspectos (Hantzche, 1985; Brix, 1993):

1) El funcionamiento de los diferentes componentes en los humedales naturales es complejo y a menudo extremadamente difícil de caracterizar. Por lo que limita grandemente la capacidad de predecir cualquier tipo de respuesta a la aplicación de aguas residuales en ellos. La eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales por los humedales naturales varía con el tiempo como consecuencia del cambio en la composición de las especies y la acumulación de contaminantes en el humedal.

2) La extrema variabilidad en los componentes de los humedales naturales, provoca que sea difícil o impráctico el traslado de los resultados de un área geográfica a otra.

Los dos puntos anteriores, aunado al posible deterioro de los humedales naturales al ser sistemas ecológicos muy sensibles a los cambios y manipulación, originó que el interés de los científicos se enfocara a la conformación de humedales artificiales.

Aunque el término "Humedales Artificiales" es de reciente creación se sabe que culturas tan antiguas como la China, la Egiptia y la Azteca, para descargar sus aguas residuales utilizaron dispositivos basados en filtros de arena y plantas silvestres que crecían en el lugar (Powicki, 1997; Ramírez, 1998).

El documento más antiguo que menciona el uso de los humedales artificiales es una nota escrita a mano por Nemo en 1904 y presentada a H. Brix por Brian Mackney de New South Wales, Australia. En él se mencionaba, como el agua residual doméstica podía ser tratada en los jardines de las casas, al ser conducida a través de un canal y desembocar en un pequeño jardín con una profundidad de 15 a 18 pulgadas. En el jardín se debían sembrar plantas que crecieran rápidamente y requieran una gran cantidad de agua como por ejemplo *Arum lilies*. (Brix, 1994a). Pero no fue hasta la época de los 50's que se inician las investigaciones en plantas como *Scirpus spp* o Jacinto de agua (*Eichhornia spp*) como posibles absorbentes de cargas de las aguas residuales (Schiller, 1996a). El primer trabajo experimental realizado para investigar el tratamiento de aguas residuales por plantas de

pantano fue desarrollado por la Dra. Käthe Seidel en el instituto Max Planck en Plön, Alemania. En 1952 investigó la remoción de fenoles de las aguas residuales utilizando *Scirpus lacustris*. (Bastian y Hammer, 1993). En 1953, en un reporte interno, Seidel sugiere que el uso de plantas apropiadas “disminuiría en los mantos acuíferos internos, su sobrefertilización, contaminación y azolve, permitiendo a las aguas contaminadas ser capaces de tener vida una vez más”. Para este fin propone a las espadañas (*Schoenoplectus lacustris*), especie capaz de remover grandes cantidades de sustancias orgánicas e inorgánicas de las aguas residuales. En experimentos posteriores, comprobó que las espadañas mejoran y enriquecen el suelo en el que crecen, debido a que aumentan el número de bacterias y humus, además de generar antibióticos que eliminaban bacterias como coliformes, salmonella y enterococos. En otro tipo de experimentos Seidel demostró que las espadañas y otro tipo de plantas superiores son capaces de eliminar metales pesados e hidrocarburos del tipo de fenoles y sus derivados de las aguas residuales (Brix, 1994a).

Los experimentos de la Dra. Seidel fueron duramente criticados en esa época, ya que al ser ella una experta en Botánica, solamente los enfocó en el uso de plantas de pantano para la remoción de nutrimentos y su transformación de materia orgánica e inorgánica, surgiendo el problema de qué hacer con cosechas altamente contaminadas (Schiller, 1996, Börner et al, 1998). A pesar de ello durante la época de los 60' estos experimentos fueron escalados al tratar agua de río para obtener agua potable y las aguas residuales de diferentes procesos, como aguas pluviales y aguas domésticas, originando el desarrollo de 3 procesos para el tratamiento de aguas residuales que son: el proceso del instituto Max Planck MPIP o Krefeld System, el Método de la zona de raíz RZM (Root Zone Method), y el proceso Lelystad, los cuales se describen brevemente a continuación: (Cooper y Boon, 1986; Brix, 1994a; Haberl, 1997; Börner et al., 1998)

1.4.1 PROCESO DEL INSTITUTO MAX PLANCK MPIP O KREFELD SYSTEM

Este proceso fue desarrollado por la Dra. Seidel y colaboradores, recibe su nombre del poblado donde por primera vez fue utilizado. El diseño consiste de cuatro o cinco etapas en cascada, donde algunas de las etapas además incluyen lechos paralelos. Las dos primeras etapas consisten de lechos donde el agua fluye por gravedad verticalmente y son alimentados intermitentemente. En algunas ocasiones la primera etapa funciona como etapa de pretratamiento para el agua residual. La parte superior de los lechos verticales fue cubierta con arena sobre la cual se plantó *Phragmites australis*, mientras que las partes inferiores contienen grava distribuida en capas de diferentes diámetros. Las siguientes etapas consisten de lechos donde el agua fluye en forma horizontal conteniendo arena o grava y diferentes tipos de macrofitas emergentes como son *Iris*, *Schoenoplectus*, *Typha*, *Sparganium*, *Carex*, y *Acorus*.

1.4.2 MÉTODO DE LA ZONA DE RAÍZ (ROOT ZONE METHOD)

Este método fue desarrollado en los años 60' por la Dra. Seidel y el Dr Kickuth en la universidad de Göttingen, Alemania. Este proceso consiste básicamente de un lecho rectangular plantado con *Phragmites australis*, en suelos seleccionados como son arcilla o arena, la cual puede incluir calcio, hierro o aluminio como aditivos para mejorar la estructura del suelo y promover la precipitación de los fosfatos. El agua residual pretratada

mecánicamente fluye bajo la superficie del suelo a través de la raíz de las plantas en forma horizontal. La entrada del influente se encuentra en un extremo del lecho y el efluente es recolectado en otro extremo.

1.4.3 PROCESO LELYSTAD

Este proceso fue desarrollado en 1967, en Holanda, por la autoridad de desarrollo IJsselmeerpolders. Se utilizó por primera ocasión en las cercanías de Elburg para tratar el agua residual generada en un campamento de verano con capacidad de 600 personas por día. Con una área de una hectárea y 0.4 m de profundidad fue construido con forma de estrella. En este sistema el agua fluye libremente sobre el suelo y entre los tallos de las plantas. Las plantas empleadas fueron del género *Scirpus*. Debido a los problemas generados por el diseño, en 1969 se construyeron zanjas y diques paralelos de 3 m de ancho y 400 m de longitud. Con esta modificación se logró realizar el mantenimiento mecánico al sistema y tener un tiempo de residencia hidráulico de 10 días (similar a lo obtenido en esas épocas con el RZM).

Es importante mencionar que este sistema requiere del doble de tamaño por unidad de agua tratada o personas servidas, comparado con el RZM. Además presenta el problema de una pequeña disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes en invierno y posible congelación de las aguas en países de climas fríos. Asimismo, cuando se aplican flujos de agua residual mayores a los considerados en el diseño, se pueden presentar malos olores y proliferación de mosquitos.

A partir de 1970, el gobierno, fundaciones y empresas alemanas dieron apoyo financiero y científico a las investigaciones de los sistemas de humedales artificiales en tres universidades alemanas ubicadas en Darmstadt, Kassel y Weihenstephan (Schiller, 1996), lo que llevó a que el sistema fuera reconocido e incorporado como propuesta técnica en algunos estados de Alemania como son: Baja Sajonia, Renania del Norte, Schleswig Holstein y Bavaria.

A nivel internacional, desde 1976 se reportan en Sudáfrica, Estados Unidos y Gran Bretaña experiencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales y, a partir de 1986, se empiezan a introducir los sistemas de humedales artificiales (Juwarkar et al., 1995).

En 1985 el Water Research center WRc del Reino Unido inició sus investigaciones sobre los humedales artificiales, después de realizar una visita a Alemania y constatar las ventajas de este tipo de ecotecnología (Boon, 1985). A finales del mismo año empezaron las operaciones del primer sistema que trataba el agua residual generada por 1300 personas (Cooper y Boon, 1986; Cooper y Green, 1995) y, para 1995, se reportan más de 400 sistemas en operación (Cooper et al, 1996).

En Estados Unidos, Wolverton, trabajando para la NASA, realizó los primeros trabajos con humedales artificiales (Wolverton, 1986). El objetivo inicial de las investigaciones era buscar el método más eficiente para purificar aire y agua en las estaciones espaciales de las colonias de la Luna (Gillete, 1996b).

En la Tabla 7 se muestra una recopilación de los diferentes tipos de aguas residuales que se han aplicado a los humedales artificiales a través de su historia (Bastian y Hammer, 1993; Vymazal, 1998). La mayoría de las investigaciones se han realizado a escala experimental o planta piloto y se han enfocado principalmente en la capacidad de los humedales para degradar materia orgánica.

TABLA 7. USOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES A TRAVÉS DE LA HISTORIA

AÑO	TIPO DE AGUA QUE TRATA EL HUMEDAL ARTIFICIAL	TIPO DE SISTEMA	REPORTO
1952	Agua residual con fenol	Experimental	Seidel
1956	Agua residual de una lechería	Experimental	Seidel
1956	Agua residual de ganado	Experimental	Seidel
1965	Desecado de lodos	Experimental	Bittman y Seidel
1968	Reducción de la eutroficación de un lago	Operacional	Kárpáti et al.
1973	Agua residual de la industria textil	Experimental	Widyanto
1974	Agua residual municipal	Operacional	Kickuth
1974	Desecado de lodos	Operacional	Neurohr
1975	Efluente de una refinería	Operacional	Lichtfield y Schatz
1975	Tratamiento de agua residual de un laboratorio fotográfico	Experimental	Wolverton y McDonald
1978	Efluente de la industria textil	Operacional	Kickuth et al.
1978	Drenaje ácido de una mina	Experimental	Huntsman
1979	Efluente de un criadero de peces	Operacional	Hammer y Rogers
1980	Efluente de la industria de galvanoplastia	Experimental	Shroff
1980	Remoción de cresol	Experimental	Wolverton y McDonald
1980	Efluente de un criadero de puercos	Experimental	Finlayson et al.
1980	Efluente de un matadero	Experimental	Finlayson y Chick
1981	Remoción de metales pesados	Experimental	Gerbersg et al.
1981	Efluente de una tenería	Experimental	Prasad et al.
1982	Drenaje ácido de una mina	Operacional	Stone; Pesavento
1982	Drenaje de campos de cultivo	Experimental	Reddy et al.
1982	Derrame pluvial urbano	Operacional	Silverman
1982	Pesticidas	Experimental	Gudekar et al.
1982	Efluente de un ingenio azucarero	Experimental	Yeol
1982	Benceno y sus derivados	Experimental	Wolverton et al.
1982	Efluente de la industria hulera	Experimental	John
1982	Reducción de la eutroficación de un lago	Experimental	Reddy
1983	Efluente de la industria hulera	Operacional	John
1983	Agua residual de un molino de pulpa y papel	Experimental	Allender; Thut
1985	Agua residual de una lechería	Operacional	Brix y Schierup
1985	Agua residual del procesado de mariscos	Experimental	Guida y Kugelman

Modificado de Bastian y Hammer, 1993; Vymazal, 1998

CONTINUACIÓN.....

TABLA 7. USOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES A TRAVÉS DE LA HISTORIA

AÑO	TIPO DE AGUA QUE TRATA EL HUMEDAL ARTIFICIAL	TIPO DE SISTEMA	REPORTÓ
1986	Agua residual del procesado de harina de papa	Experimental	De Zeeuw et al.
1986	Lixiviados de desechos porcícolas	Operacional	Gray et al.
1986	Cianuros y clorofenoles	Experimental	Wolverton y Bounds
1986	Lixiviados de un estanque de cenizas	Operacional	Brodie et al.
1987	Agua con carga térmica	Operacional	Ailstock
1987	Efluente del procesado de carne	Experimental	van Oostrom y Cooper
1988	Lixiviados de un relleno sanitario	Experimental	Staubitz et al., Birkbeck et al.
1988	Agua residual de ganado	Operacional	Hammer
1989	Tratamiento de aguas subterráneas con altas concentraciones de nitratos	Experimental	Stengel y Schultz-Hock, 1989
1989	Lixiviados de relleno sanitario	Operacional	Surface et al.
1989	Drenaje de campos de cultivo	Operacional	Higgins et al.
1989	Agua del procesado del azúcar de remolacha	Operacional	Anderson
1989	Desechos de aves	Experimental	Vymazal
1990	Materiales del dragado de un puerto	Experimental	Pauly
1991	Agua residual de un molino de pulpa y papel	Operacional	Thut
1992	Agua residual de una panadería	Operacional	Vymazal
1993	Drenajes de autopistas	Operacional	Swift y Landsdown
1994	Agua residual de un matadero	Operacional	Vymazal
1994	Derrames contaminados con glycol	Operacional	Worrall
1994	Salida de agua urbana superficial	Operacional	Scholles et al.
1997	Lixiviado de cenizas de la planta generadora de energía Allegheny	Operacional	Powicki, 1997
1999	Agua subterránea contaminada con explosivos proveniente de las plantas de municiones de la Armada de EEUUA	Experimental	Best, 1999
1999	Agua contaminada con elementos radioactivos y metales pesados	Experimental	Groudev et al., 1999

Modificado de Bastian y Hammer, 1993; Vymazal, 1998

1.5 SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad este tipo de ecotecnología es aplicada en varios países de Europa, América, África, Asia y Australia, no solamente para tratar aguas residuales domésticas si no también para tratar efluentes con muy distintas características.

Países europeos como Alemania, Austria e Inglaterra así como universidades o asociaciones norteamericanas, se han preocupado por transferir esta ecotecnología a Latinoamérica, ya que consideran puede ser de gran ayuda para solucionar sus problemas ambientales. Por lo que han suscrito varios convenios con países latinoamericanos, para compartir sus experiencias y realizar estudios encaminados a la adaptación de la tecnología bajo las condiciones ambientales de las distintas zonas geográficas (Haberl, 1999). A la fecha, se tienen reportes del uso de este tipo de sistemas en países como Argentina (Schiller, 1996, 1996 a), Nicaragua (Foidl, 1997, 1998) y México (De Garza, 1990; Rivera et al., 1996; Luján, 1997, Luna Pabello et al., 1998).

En cuanto a diseño conceptual de los mismos existen diferencias de aplicación entre continentes y entre países desarrollados y en vías de desarrollo. En Europa, los sistemas de humedales artificiales son utilizados principalmente como sistemas secundarios para tratar el agua residual generada por comunidades de más 1000 p.e. En Estados Unidos de Norteamérica y Canadá, se aplican como sistemas terciarios para grandes poblaciones. Otra diferencia es que los sistemas en Europa son específicamente construidos con la finalidad de dar un tratamiento a las aguas residuales, mientras que en Norteamérica a menudo son creados a partir de humedales naturales o recuperados (Cooper, 1993).

En los países en vías de desarrollo, el uso de humedales artificiales se ha enfocado principalmente al tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico y reúso en el riego de cultivos agrícolas. En cambio, en los países desarrollados no se ha limitado a tratar las aguas residuales domésticas, si no también es aplicado a aguas residuales de tipo industrial y las últimas investigaciones están encaminadas a tratar aguas contaminadas con radiación y metales pesados (Groudev et al., 1999).

En el capítulo dos se describen los diferentes mecanismos de remoción de contaminantes en los humedales artificiales y los diferentes tipos de sistemas construidos hasta la fecha.

CAPITULO II: ASPECTOS RELEVANTES SOBRE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los dos componentes principales de los humedales artificiales son: los microorganismos y las macrofitas o plantas y, para algunos tipos de humedales artificiales el lecho o substrato que los soporta, es por ello que se afirma que su operación se basa en la actividad bioquímica de los microorganismos y de los vegetales distribuidos en el lecho, los cuales eliminan materiales disueltos y suspendidos del agua residual (Reed, y Brown, 1992; Rivera y Calderón, 1993). Fundamentalmente el proceso de depuración es aerobio en las áreas próximas a las raíces de las macrofitas, aunque también sigue un comportamiento anóxico-anaerobio en las zonas más alejadas, lo que indica el desarrollo de una gran variedad de microorganismos dentro del lecho, los cuales biodegradan los materiales orgánicos hasta mineralizarlos (Hu, 1991).

Las macrofitas tienen la función de proporcionar oxígeno al medio, además, estabilizan la superficie de los lechos, proveen de buenas condiciones para la filtración, funcionan como aislantes de la superficie al eliminar la posibilidad de que se congele y sus tejidos proporcionan una gran área donde densas comunidades de algas fotosintéticas, bacterias y protozoos se adhieren (Brix, 1997). La presencia de la vegetación distribuye y reduce la velocidad del agua residual, crea mejores condiciones para la sedimentación de los sólidos suspendidos, reduce el riesgo de erosión y resuspensión e incrementa el tiempo de contacto entre el agua residual y la superficie de las plantas.

En este capítulo se describen los principales procesos que se llevan a cabo dentro de los sistemas de humedales artificiales para lograr la depuración del agua residual, las características de los diferentes tipos de sistemas existentes y se comparan aspectos técnicos de los sistemas de humedales artificiales de flujo horizontal y vertical.

2.1 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

En los sistemas de humedales artificiales, la remoción de contaminantes tales como, compuestos orgánicos (DBO, DQO), sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, metales y microorganismos patógenos, se realiza por una compleja variedad de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interaccionar el suelo, las plantas y el medio acuoso (Watson y Hobson, 1989; Brix, 1993; Cooper et al., 1996; Vymazal et al., 1998). Biológicamente, son más diversos que los sistemas de tratamiento biológico convencional (Cooper et al., 1996). En la tabla 8 se resumen este tipo de mecanismos y en la figura 3 se muestra en forma de diagrama la interacción entre los componentes del humedal y los procesos de eliminación de contaminantes.

TABLA 8. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES

MECANISMO	CONTAMINANTE AFECTADO	DESCRIPCIÓN
<i>FÍSICOS</i>		
SEDIMENTACIÓN	P) Sólidos sedimentables S) Sólidos coloidales I) DBO, N, P, metales pesados orgánicos y refractarios, bacterias y virus	Sedimentación por gravedad de los sólidos
FILTRACIÓN	S) Sólidos sedimentables S) Sólidos coloidales	Las partículas son retenidas mecánicamente a medida que pasa el agua por el substrato y masa de raíces
ADSORCIÓN	S) Sólidos coloidales	Fuerzas de atracción entre partículas (Van der Waals)
VOLATILIZACIÓN	S) N	Volatilización del NH ₃ del agua residual.
<i>QUÍMICOS</i>		
PRECIPITACIÓN	P) P y metales pesados	Formación o coprecipitación con compuestos insolubles.
ADSORCIÓN	P) P, metales pesados S) Orgánicos refractarios	Adsorción sobre superficie de substrato y planta.
DESCOMPOSICIÓN	P) Orgánicos refractarios	Descomposición o alteración de compuestos menos estables por fenómenos como irradiación por U.V., oxidación y reducción.
<i>BIOLÓGICOS</i>		
METABOLISMO MICROBIANO	P) Sólidos coloidales, DBO, N, orgánicos refractarios, metales pesados	Remoción de sólidos coloidales y orgánicos solubles por bacterias suspendidas, bénticas y adheridas a las plantas.
METABOLISMO DE LAS PLANTAS	S) Orgánicos refractarios, bacterias y virus	Consumo y metabolismo de orgánicos por las plantas. Las secreciones de las raíces pueden ser tóxicas a los organismos de origen entérico.
ABSORCIÓN DE LAS PLANTAS	S) N, P, metales pesados, orgánicos refractarios.	Bajo condiciones apropiadas, cantidades significativas de estos contaminantes pueden ser tomadas por las plantas.
MUERTE NATURAL	P) Bacterias y virus	Decaimiento natural de microorganismos en ambientes desfavorables.

Donde: P) Efecto Primario; S) Efecto secundario; I) Efecto incidental.
DBO demanda bioquímica de Oxígeno; N nitrógeno; P fósforo.

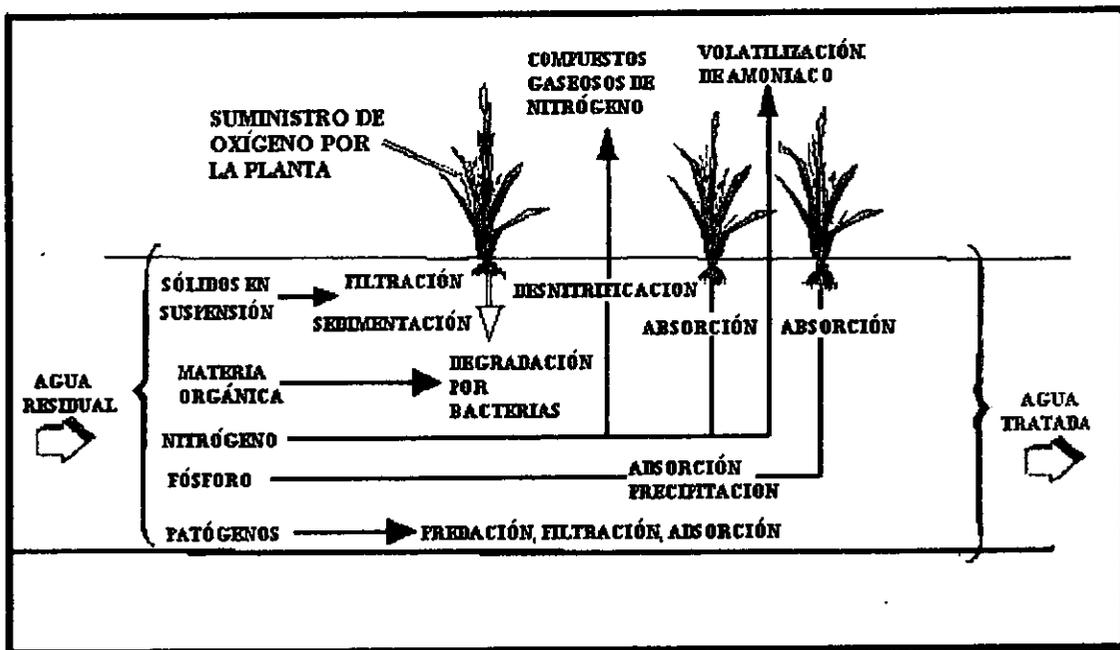


FIGURA 3. MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES (Modificada de Lara, 1998)

2.1.1 MECANISMOS FÍSICOS DE ELIMINACIÓN

En los sistemas de humedales artificiales el agua residual puede ser alimentada al sistema ya sea cruda o preferentemente después de un pretratamiento mecánico, en donde gran parte de los sólidos sedimentables y solubles son eliminados. Como se observa en la figura 3, los sólidos suspendidos, que permanecen en el agua residual después del pretratamiento, son removidos en el lecho de los humedales por sedimentación y filtración con un porcentaje de remoción del 65 al 90% (Ramírez, 1998). Los sólidos no sedimentables o coloidales son removidos parcialmente por:

- el crecimiento bacteriano provocando la sedimentación de algunos sólidos coloidales y la disminución de otros
 - la colisión entre partículas generada por el movimiento browniano e inercial y fenómenos de adsorción por otros sólidos, las plantas y el fondo del humedal.
- Además, en este paso de manera incidental, parte de otro tipo de constituyentes de las aguas residuales como son: materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales y microorganismos patógenos son removidos (Brix, 1993; Haberl, 1997; Ramírez, 1998; Vymazal et al., 1998).

2.1.2 MECANISMOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DE ELIMINACIÓN

La materia orgánica es degradada principalmente por microorganismos adheridos a la superficie del tejido de las plantas y del lecho (Brix, 1997). La degradación es realizada por microorganismos aerobios que se encuentran cerca de la zona de la raíz (Brix, 1994), por anaerobios facultativos en la zona intermedia y por anaerobios estrictos en la zona más alejada, lo que indica el desarrollo de una gran variedad de microorganismos dentro del

lecho, que incluyen no solo a las bacterias sino también a los protozoos (Rivera y Calderón, 1993).

De manera particular la rizosfera constituye una zona alrededor de las raíces y en íntimo contacto con el suelo o material filtrante, en donde se llevan a cabo importantes procesos microbianos que definen el desarrollo de la plantas superiores y la transformación aerobia y/o microaerobia de los contaminantes orgánicos disueltos (Luna-Pabello et al., 1997a).

Los nutrimentos como nitrógeno y fósforo son eliminados principalmente por procesos químicos y biológicos (Haberl, 1997). El nitrógeno es eliminado principalmente en el proceso biológico (Bahlo y Wach, 1992) mediante la nitrificación y la desnitrificación. El amoníaco es oxidado a nitrato por bacterias nitrificantes en las zonas aerobias. Los nitratos son convertidos a nitrógeno molecular por medio de la desnitrificación en las zonas anóxicas. El oxígeno requerido para la nitrificación es transportado por difusión de la atmósfera, las hojas y tallos hacia las raíces y rizomas de las plantas, originándose en la rizosfera una zona aerobia (Cooper et al., 1996). Cierta cantidad de nitratos y amoníaco son adsorbidos y desorbidos por los humatos y minerales arcillosos del substrato al competir con otros tipos de iones. Las plantas también participan al tomar el nitrógeno en su estado mineral e incorporarlo a su biomasa.

La oxidación biológica produce la conversión de la mayor parte del fósforo orgánico a ortofosfatos, forma en que se encuentra en el agua residual. La remoción de ortofosfatos se lleva a cabo principalmente por reacciones de adsorción, formación de complejos y precipitación con aluminio, hierro, calcio y minerales arcillosos que contiene el substrato. El consumo de fósforo por parte de las plantas para su biomasa y la asimilación por los microorganismos se considera insignificante en comparación con los efectos de adsorción. Algunos autores sugieren que la reducción de fósforo también se lleva a cabo en condiciones anaerobias (Cooper et al., 1996).

Los factores químicos que llevan a la remoción de los microorganismos patógenos son: la oxidación, la radiación ultra violeta, la exposición a biocidas generados en las raíces de las plantas y la adsorción por la materia orgánica. La remoción biológica de microorganismos patógenos se debe a mecanismos de antibiosis, predación por nemátodos, protistas y zooplancton, ataque por bacterias líticas, virus y muerte natural por estar en un ambiente desfavorable (Brix, 1993; Rivera y Calderón, 1993; Cooper et al., 1996; Vymazal et al., 1998).

La remoción de metales del agua residual, ocurre químicamente en el substrato por precipitación, adsorción, difusión, intercambio iónico y quelación. El proceso ocurre biológicamente por fenómenos de adsorción y toma de iones o translocación por las plantas y mediante bacterias que tienen la capacidad de oxidar a los metales en las zonas aerobias y bacterias sulfato reductoras en las zonas anaerobias, las cuales causan la precipitación de los óxidos metálicos y sulfuros (Brix, 1993, Cooper et al., 1996; Vymazal et al., 1998).

En la figura 4 se describe el papel que presentan los diferentes componentes de los humedales artificiales en la remoción de los metales.

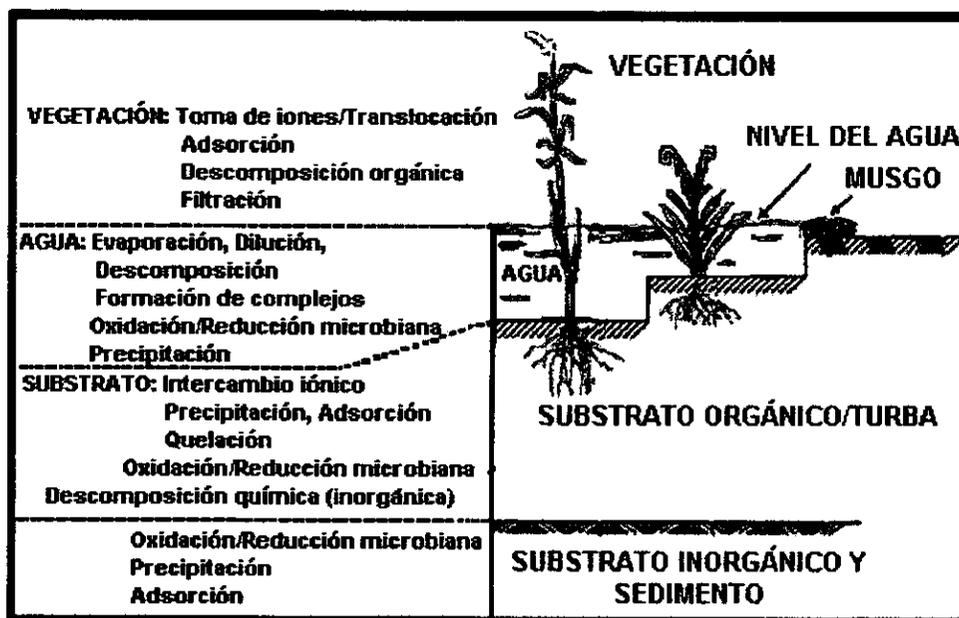


FIGURA 4. PROCESOS FÍSICOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DE REMOCIÓN DE METALES EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES (Modificado de Cooper et al., 1996)

2.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Brix (1993) sugiere clasificar a los sistemas de humedales artificiales en cuatro tipos diferentes para lo que toma como base la forma de vida de las macrofitas dominantes del sistema, estos corresponden a:

1. Sistemas de plantas de libre flotación
2. Sistemas de plantas con raíces emergentes, como son los sistemas de flujo superficial y de flujo subsuperficial estos últimos a la vez se subdividen en:
 - a) Sistemas de flujo horizontal
 - b) Sistemas de flujo vertical.
 - c) Sistemas híbridos
3. Sistemas de plantas subemergentes
4. Sistemas multietapa

En la mayoría de las publicaciones no se separan a los sistemas multietapa de los demás sistemas. En norteamérica y Canadá los sistemas que más se han empleado son los de raíces emergentes del tipo flujo superficial, que son los más parecidos a los humedales naturales, mientras que en Europa la tendencia es a utilizar sistemas de flujo subsuperficial (Haberl, 1997; Cole, 1998). En la última década se ha intensificado el estudio de los sistemas de flujo vertical y los sistemas híbridos debido a las normas más estrictas en cuanto a la remoción del nitrógeno total en los efluentes (Cooper, 1993).

En las figuras 5, 6 y 7 se presentan los esquemas de algunas macrofitas representativas de los sistemas de humedales de plantas de libre flotación, sistemas de plantas con raíces emergentes y sistemas de plantas subemergentes. En estos se observa que la diferencia

entre los sistemas, es la ubicación de las raíces, el tallo y las hojas con respecto al agua y el sustrato en el cual se localizan.

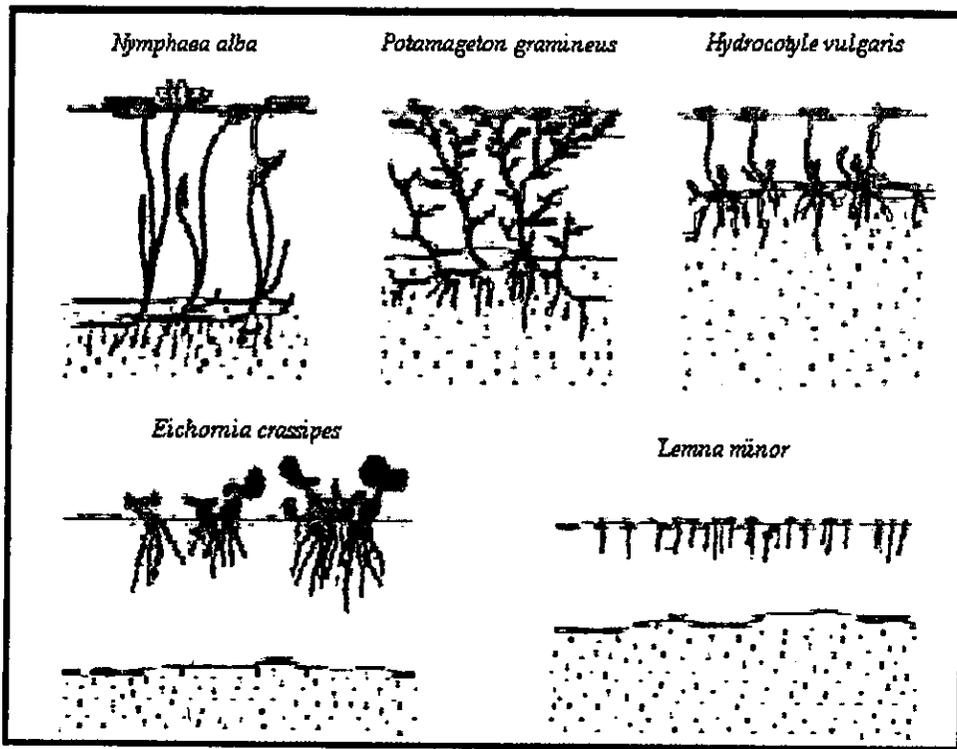


FIGURA 5. MACROFITAS ACUÁTICAS DE HOJAS FLOTANTES Y LIBRE FLOTACIÓN (Vymazal et al., 1998)

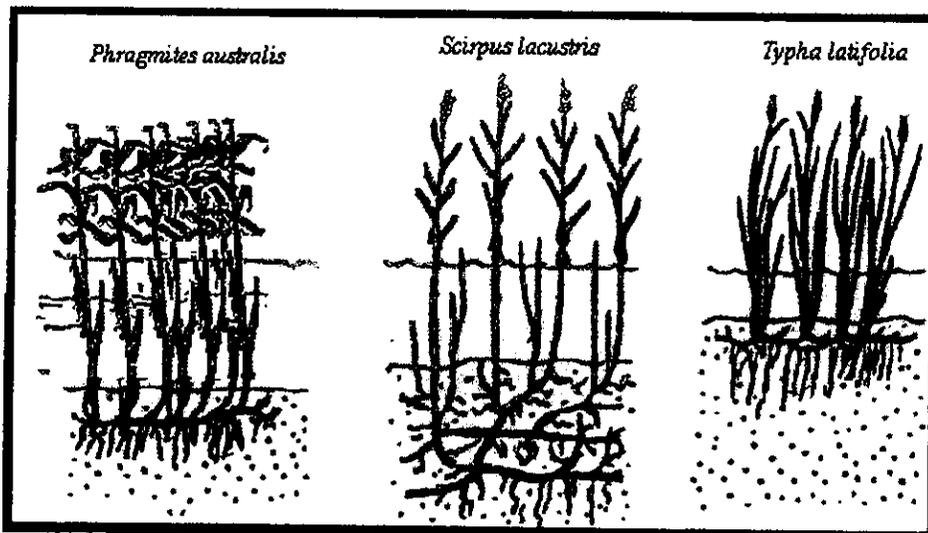


FIGURA 6. MACROFITAS ACUÁTICAS EMERGENTES (Vymazal et al., 1998)

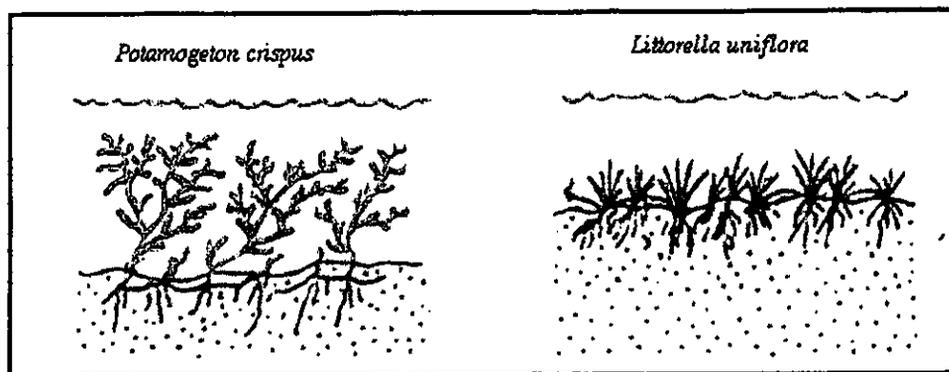


FIGURA 7. MACROFITAS ACUÁTICAS SUBEMERGENTES
(Vymazal et al., 1998)

En el Anexo II se complementa la información sobre el papel de las macrofitas en los sistemas de humedales artificiales y se presentan una recopilación fotográfica de algunas de las plantas más empleadas en este tipo de sistemas.

2.2.1 SISTEMAS DE PLANTAS DE LIBRE FLOTACIÓN

Los sistemas de libre flotación son muy diversos en formas y hábitat, se utilizan como pulimento de aguas residuales provenientes de sistemas secundarios de tratamientos de pequeñas o medianas comunidades aunque también se han utilizado para el tratamiento de aguas de tipo industrial. Consisten generalmente de estanques o lagunas donde las plantas se multiplican. Es recomendable construirlas con un declive para que el influente fluya por gravedad y entre menor profundidad presenten, la remoción de contaminantes es mejor. Se emplean desde plantas grandes con hojas aéreas o flotantes y raíces sumergidas bien desarrolladas como los jacintos de agua, nenúfares o el lirio acuático, hasta plantas flotantes muy pequeñas con pocas o sin raíces como las de la familia de las Lemnáceas (*Lemna* o lentejilla de agua, *Spirodela*, *Wolffia*, *Wolffiella*) y *Salvinias* (Rico et al., 1992; Brix, 1993, Olguin et al., 1994; Metcalf y Eddy, 1996). Son sistemas muy eficientes en la remoción de nitrógeno, fósforo y metales pesados, el lirio acuático puede remover hasta 350 kg. de fósforo y 2000 kg. de nitrógeno por año (Brix, 1997). Cuando el agua residual se encuentra libre de compuestos tóxicos, los nutrientes son recuperados y transformados en biomasa invaluable, que es fácilmente cultivable y contiene más proteínas y menos fibra que las plantas emergentes. En el caso de *Lemna minor*, la biomasa obtenida se puede utilizar para la alimentación animal, aportando un contenido de proteína del 40%. La principal limitación que presenta es el gran requerimiento de área y si no es operado adecuadamente, se generan mosquitos y olores desagradables (Olguin y Hernández, 1998). La figura 8 con nenúfares en su superficie representa a este tipo de humedales, este sistema fue construido por la Universidad estatal de Carolina del Norte en Estados Unidos, el objetivo fue mejorar la calidad del agua del poblado de Muddy Fork reduciendo la contaminación no puntual generada por establos y campos de cultivo de la zona, además de tener propósitos educativos.

2.2.3 SISTEMAS SUBEMERGENTES

Las plantas de los sistemas subemergentes tienen sus tejidos completamente sumergidos en el agua. La morfología y ecología de las especies varía de pequeñas plantas de baja productividad tipo rosetas que crecen en aguas oligotróficas como *Isoetes lacustris* y *Lobelia dortmanna*, a grandes plantas de alta productividad tipo elodea que crecen en aguas eutróficas como *Elodea canadensis*.

Las plantas acuáticas subemergentes tienen la capacidad de asimilar nutrientes de las aguas residuales, pero solo crecen adecuadamente en aguas oxigenadas por lo que no pueden ser empleadas en aguas residuales con alto contenido de carga orgánica o que se biodegraden rápidamente ya que la descomposición microbiológica de la materia orgánica crea condiciones anóxicas. Además, la turbiedad del agua no debe ser muy alta de tal manera que permita que la luz solar llegue a las plantas. Es por ello que su uso potencial se limita a servir de pulimento de tratamientos secundarios de aguas residuales, aunque se han reportado buenos resultados en la depuración de aguas residuales domésticas empleando *Elodea nuttallii* (Brix, 1993; Vymazal et al., 1998). En la actualidad se reportan estudios empleando especies como *Egeria densa*, *Elodea canadensis*, *Elodea nuttalli*, *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata*, *Cabomba caroliniana*, *Myriophyllum heterophyllum* y *Potamogeton spp.* La figura 15 representa el esquema de un humedal de este tipo.

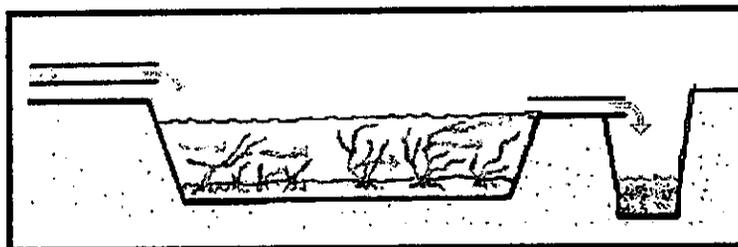


FIGURA 15. ESQUEMA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACROFITAS SUBEMERGENTES
(Modificado de Brix, 1993)

Brix (1993), comenta que las macrofitas subemergentes disminuyen el contenido de carbono inorgánico disuelto en el agua y aumentan el contenido de oxígeno disuelto durante los períodos de actividad fotosintética. Como resultado se incrementa el pH crean condiciones óptimas para que el amoníaco se volatilice, se precipite químicamente el fósforo y se mineralice la materia orgánica del agua. Los nutrientes asimilados por las macrofitas son retenidos en los tejidos de las raíces y por la microbiota adherida a ellas. Al morir las hojas, los nutrientes contenidos en estas, son captados por las plantas adyacentes y las hojas son acumuladas y retenidas en el fondo del humedal.

2.2.4 SISTEMAS MULTIETAPA

Consisten en la combinación de los sistemas mencionados anteriormente y/o otros tipos de sistemas denominados de baja tecnología como son los sistemas de filtración por arena y las lagunas de oxidación (Brix, 1993 y 1994a; Vymazal, 1998). Un ejemplo hipotético de

este tipo de sistemas se muestra en la figura 16, en la que se señalan 5 etapas que corresponden a:

- 1) Un tratamiento primario donde se realiza una sedimentación. En la figura 16 se ilustra un sedimentador pero también se puede emplear una fosa séptica o cualquier otro tipo de sistemas mecánicos.
- 2) Un tratamiento secundario que consiste en un sistema de humedales del tipo de libre flotación, flujo superficial o subsuperficial. En el caso de la figura 16 se utilizan cuatro camas con flujo vertical y alimentación intermitente (dos días de alimentación por 6 días de descanso para que se sequen).
- 3) Un tratamiento terciario que consta de un sistema de humedales de libre flotación, flujo superficial o subsuperficial. El tipo de sistema utilizado en este paso depende de las características del agua residual, los requerimientos del tratamiento, el clima y la cantidad de tierra disponible. En la figura 16 se colocaron dos camas de flujo vertical y alimentación intermitente (dos días de carga por dos días de descanso), el efluente obtenido es completamente nitrificado.
- 4) Un humedal de flujo horizontal, para obtener un efluente desnitrificado
- 5) Un humedal de flujo vertical de alimentación continua, como etapa de pulido. La función del HAFV es la de tomar los remanentes de los nutrientes y de proporcionar oxígeno al agua tratada.

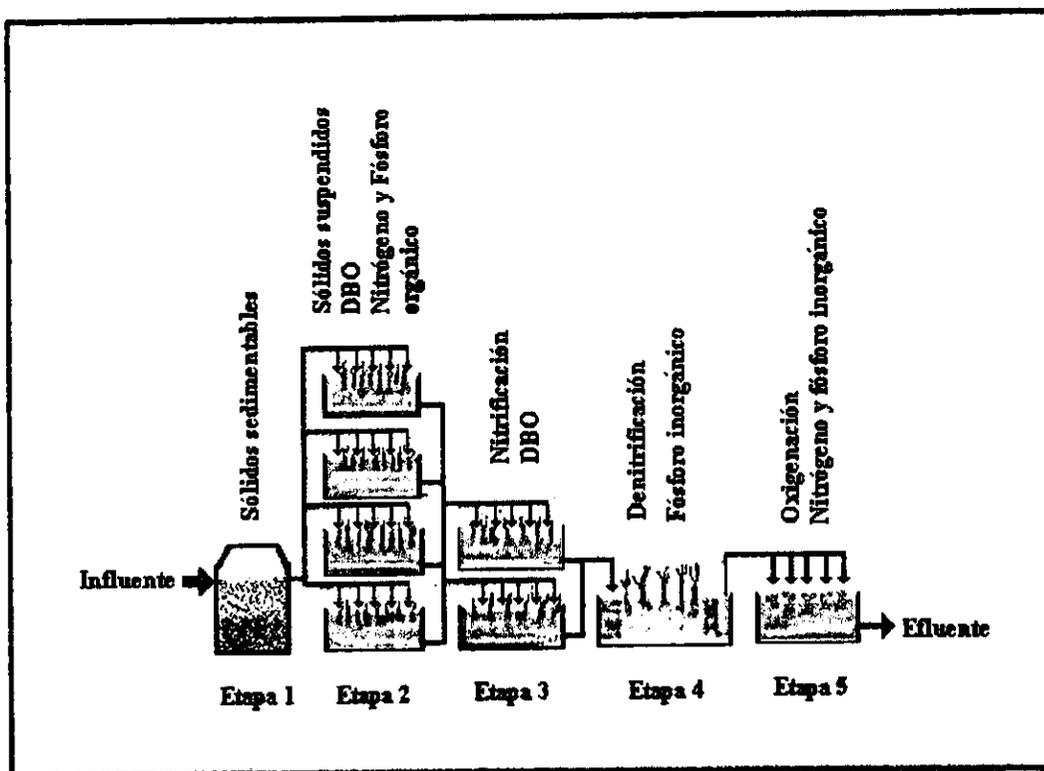


FIGURA 16. SISTEMA HIPÓTETICO MULTIETAPA. (Fuente: Brix, 1993)

2.3 COMPARACIÓN ENTRE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL, VERTICAL E HIBRIDOS

Las diferencias entre los sistemas de flujo horizontal, vertical e híbridos no solamente se limitan al diseño estructural, sino también a la capacidad de remoción de contaminantes, es por ello que en la tabla 9 se presenta la comparación cualitativa de los datos publicados en la literatura. Al analizar la tabla 9 se observa que los sistemas de flujo horizontal generan efluentes desnitrificados, mientras que los de flujo vertical pueden remover en mayor proporción fósforo y producir efluentes nitrificados al ser mayor la transferencia de oxígeno. Como se mencionó anteriormente los sistemas híbridos son más eficientes que los sistemas verticales y horizontales por separado, produciendo efluentes con baja carga de DBO, completamente nitrificados y parcialmente desnitrificados (Cooper, 1999). Es importante mencionar que cuando se utilizan los sistemas verticales y horizontales como sistemas terciarios su eficiencia de remoción aumenta, pudiéndose obtener efluentes bien nitrificados en sistemas horizontales (Batchelor y Loots; 1997; von Felde y Kunst, 1997; Cooper, 1999).

De la observación de la tabla 9 se concluye, que la selección de uno u otro tipo de sistemas dependerá de la calidad de agua que se pretenda tratar, así como de los requerimientos de descarga que se deseen obtener. En todos los casos, es recomendable la existencia de un pretratamiento que permita la eliminación de los sólidos suspendidos, así como de grasas y aceites. El fin del pretratamiento es prolongar la vida útil del humedal artificial al prevenir su rápido azolvamiento y obtener una mejor calidad de agua tratada (Luna-Pabello et al., 1997).

La eficiencia de purificación de los humedales se encuentra fuertemente relacionada con las características hidráulicas del sistema definidas en el diseño. Todos los modelos que se utilizan para el dimensionamiento asumen condiciones uniformes de flujo laminar, además, de no existir restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento. Estas suposiciones han llevado a considerar a los humedales subsuperficiales como reactores biológicos ideales de flujo pistón regidos por una cinética de primer orden para la remoción de DBO₅ y nitrógeno. Con base en este supuesto se calcula el área total del sistema. El cálculo del área de la sección transversal perpendicular al flujo se realiza empleando la ecuación de D'arcy, ya que describe el régimen de flujo en un medio poroso ideal (Watson y Hobson, 1989; EPA, 1993) y, para el cálculo del tiempo de residencia hidráulico del agua dentro del humedal, se considera solamente el volumen del sistema y la velocidad de flujo. Estas ecuaciones ideales se recopilaron en la tabla 10, su uso ha llevado a la construcción de humedales artificiales funcionales pero sobrediseñados (King et al., 1996). Aunque para los HAFV se emplean las mismas ecuaciones que para los HAFH Cooper (1999) sugiere el uso de una nueva ecuación que involucra parámetros obtenidos experimentalmente de los sistemas híbridos.

Algunos autores han realizado estudios y cálculos en los que consideran modelos de cinéticas de otros órdenes para la eliminación de los contaminantes, otros tipos de flujo como flujos pistón con dispersión axial o flujos totalmente mezclados o turbulentos y consideran las variaciones del flujo ocasionadas por la precipitación, evaporación,

TABLA 9. TABLA COMPARATIVA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ENTRE HAFH, HAFV E HÍBRIDOS

TIPO DE SISTEMA	Capacidad de transferencia de Oxígeno	DBO	DQO	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃	N _{TOT}	P (b)	SST	BACTERIAS	REFERENCIA
HAFH										
Secundario	Pobre	Buena 80-90%	Buena 70-80%	Pobre 20-30% (a)	Buena 95%	Buena 39-51%	Pobre 30-50%	Buena 80-88%	Muy buena 99.9%	Haberl, 1997 Haberl et al., 1998; Cooper, 1999 Rivas, 1997
HAFV										
Secundario	Muy Buena	Muy Buena 96%	Buena 92%	Muy Buena 90-94%		Pobre 23%	Buena 63%	Regular	Buena	von Felde y Kunst, 1997; Haberl et al., 1998 Cooper, 1999:
Terciario Agua doméstica			Muy Buena 93-99%			Buena 82-89%	Muy Buena 93-96%			
Secundario flujo inverso		Buena >80%				Buena 20%	Pobre 30-50% ^a	Buena >75%	Muy Buena 99%	Chick y Mitchell, 1995
HÍBRIDO	Muy Buena	Muy Buena 96%	Buena 90%	Buena 90%	Buena		Buena 70%	Buena	Muy Buena	Cooper, 1999
Dos HAFV					Buena 65%	Buena 72%				Laber y Haberl, 1997
HAFV y HAFH			Buena 40-85%	Buena en el HAFV 80-95%	Buena en el HAFH 75-80%		Regular 25-35%			Platzer, 1996
HAFH y HAFV		Buena 84-94%		Buena 86-89%		Buena 57-66%	Buena 74-91%	Buena 67-84%		Cooper, 1999

a) Depende del tiempo de retención hidráulica, entre mayor sea el tiempo mayor es la eficiencia de remoción del sistema.

b) Depende de las características químicas del sustrato.

TABLA 10. ECUACIONES DE DISEÑO PARA LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

TIPO DE SISTEMA	ECUACIÓN	DONDE	REFERENCIA
HFH			
ÁREA TOTAL	$A_h = \frac{Q_d(\ln C_o - \ln C_i)}{k_{DBO} * d * n}$ $A_h = L * W$	A_h = Área total (m ²) Q_d = Flujo volumétrico de alimentación promedio diario (m ³ /d) C_o = Promedio diario de DBO ₅ en la alimentación (mg/l) C_i = Promedio diario de DBO ₅ en el efluente, (mg/l) k_{DBO} = Constante de rapidez de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, (m/d). d = Profundidad del lecho (m) n = Porosidad del lecho L = Longitud del lecho W = Ancho del lecho	EPA, 1993; Cooper, 1999
CONSTANTE DE RAPIDEZ DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	$k_{DBO} = K_{20} * (1.1)^{T-20}$ $K_{20} = K_o * (37.31) * n^{4.172}$	K_{20} = Constante de primer orden a 20 °C n = Porosidad del lecho	EPA, 1993
TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO	$t = V_n / Q_d = L W d_n / Q_d = A_h d_n / Q_d$	V = Volumen de la cama (m ³) n = Porosidad del sistema L = Longitud del sistema paralelo al patrón de flujo (m) W = Ancho del sistema (m) d = Profundidad de diseño (m)	Vymazal et al., 1998
ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	$A_c = Q_s / K_f (dH/ds)$	A_c = Área de la sección transversal (m ²) Q_s = Flujo volumétrico de alimentación promedio diario (m ³ /s) K_f = Conductividad hidráulica del lecho (m/s) dH/ds = Pendiente del fondo del lecho (m/m)	Vymazal et al., 1998
HÍBRIDO			
ÁREA	$A_1 = 3.6 \text{ p.e.}^{0.35} + 0.6 \text{ p.e.}$ Para <100 p.e. $A_2 = \%50 A_1$	A_1 = Área del primer humedal vertical, (m) A_2 = Área del segundo humedal vertical (m) p.e. = Población equivalente	Cooper, 1999

TABLA 11. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL Y VERTICAL

CRITERIO DE DISEÑO	HAFH	HAFV
Pretratamiento	Al menos primario	Al menos primario
Carga orgánica	De 80 a < 150 kg DBO ₅ /ha.*d	N.D.
Carga hidráulica	5- 20 cm/d	N.D.
Área específica	1-5 m ² /Pe	1-2.5 m ² / Pe
Tiempo de retención hidráulico	> 5 días	N.D.
Relación largo ancho (L:W)	De < 1:1 a 3:1	N.D.
Medio de soporte	Grava lavada, piedras (3-16 mm)	La granulometría se muestra en la tabla 12
Conductividad hidráulica del substrato	10 ⁻³ a 3*10 ⁻³ m/s	> 10 ⁻³ a 10 ⁻⁴ m/s
Profundidad del substrato	0.6-0.8 m	> 0.8 m
Porosidad media del medio de soporte	0.3-0.45	N.D.
Pendiente del fondo del humedal	1.0%	1.0%
Impermeabilizante del fondo del humedal	HDPE, LDPE, PVC espesor 0.5-1.0	HDPE, LDPE, PVC espesor 0.5-1.0
Vegetación	Carrizo, tule y juncos	Carrizo, tule y juncos
Área mínima del humedal	20 m ²	10 m ²

N. D. No existe información al respecto en la literatura.

TABLA 12. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE SOPORTE PARA LOS HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL

	REINO UNIDO (Vymazal et al, 1998)		AUSTRIA (Haberl, 1997)	
	PROFUNDIDAD (cm)	TIPO DE MATERIAL	PROFUNDIDAD (cm)	TAMAÑO DEL MATERIAL
CAPA SUPERIOR	8	arena fina	5/20	8-16 mm
	15	grava lavada de 6 mm	60	0-4 y 4-8 mm. en relación 1:1
	10	grava lavada de 12 mm	10	4-8 mm
CAPA INFERIOR	15	grava lavada de 30-60 mm	20	16-32 mm

En el capítulo tres se presentan el desarrollo de los sistemas de humedales en México, la metodología empleada para recopilar la información de los humedales construidos en el país y los resultados obtenidos.

CAPITULO III: DESARROLLO Y SITUACIÓN ACTUAL DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL EN MÉXICO

En México de cerca de 231 m³/s de aguas residuales generadas, solamente el 15.3% son tratadas, descargándose al ambiente 196 m³/s sin tratamiento alguno (CNA, 1997), lo que ocasiona la contaminación del suelo y mantos acuíferos y provoca la disminución en la calidad de vida de las personas. Es por ello que es indispensable la implantación de sistemas de tratamiento de aguas residuales que sean económicos, de fácil construcción y operación; de lo que surgen los humedales artificiales como una opción aplicable a la infraestructura del país.

En este capítulo se realiza una reseña del desarrollo que han tenido los sistemas de humedales artificiales en México, se explica la metodología empleada para la recopilación de la información generada por los mismos y se presentan los resultados obtenidos.

3.1 SITUACIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

Los sistemas de depuración con que cuenta el país abarcan una gran variedad de procesos, sin embargo de los 808 sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales con una capacidad instalada de 54.98 m³/s solamente el 76% (615) se encuentran en operación, con un gasto de 35.34 m³/s. El 24% (193) restante se encuentra fuera de operación debido principalmente a la falta de recursos financieros, errores conceptuales en su diseño o a la falta de personal capacitado para su manejo (CNA, 1997).

Los principales procesos utilizados en México son las lagunas de estabilización con un total de 416 plantas (51.46%) y los sistemas convencionales de lodos activados con 174 plantas (21.53%), el 27% restante corresponde a Tanques Imhoff (7.30%), filtros biológicos (3.96%), Zanjias de oxidación (2.35%) y otro tipo de sistemas (13.37%) en donde se incluyen a los humedales artificiales, sin especificar el número total.

3.2. METODOLOGÍA DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN MEXICO

La estrategia seguida para recopilar la información generada en México sobre los humedales artificiales se dividió en tres partes que fueron:

- 1) Búsqueda y recopilación bibliográfica.

2) Realización de un cuestionario- encuesta para solicitar información sobre los humedales construidos en México. (Anexo 1).

3) Envío del cuestionario- encuesta a las personas y entidades académicas, gubernamentales y privadas involucradas en la construcción u operación de los humedales artificiales, por tres conductos: vía fax, correo electrónico y entrega personal. Como complemento se colocó en una tabla de mensajes de una página de Internet la solicitud de información sobre los humedales artificiales.

3.2.1 BUSQUEDA Y RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda y recopilación bibliográfica se dividió en dos partes: revisión de información en medios impresos y revisión en medios electrónicos.

La recopilación bibliográfica publicada en medios impresos se realizó buscando información en diferentes bibliotecas de institutos de investigación del área metropolitana y el estado de Morelos, universidades del área metropolitana, secretarías de estado y asociaciones de personas involucradas en tratamiento de las aguas residuales como por ejemplo FEMISCA. Esta incluye: libros, revistas nacionales e internacionales, memorias de congresos, simposios, seminarios y tesis.

La consulta en medios electrónicos se realizó por medio de Internet y un software de computadora.

3.2.1.1 CONSULTA EN MEDIOS ELECTRÓNICOS

La búsqueda en Internet sobre humedales artificiales dio como resultado la presentación de un gran número de ligas a páginas electrónicas. Los buscadores de páginas de Internet que resultaron ser más eficientes para la realización de esta tesis por orden de importancia fueron: Altavista, Lycos, Yohoo, Goglee y Excite.

Más del 50% de la información en Internet, esta relacionada con la difusión, construcción y diseño de humedales artificiales que manejan aguas residuales domésticas y de tipo subsuperficial. Un 25% trata sobre estudios o aplicaciones como son: el tratamiento de aguas residuales generadas por animales, agua de lluvia, humedales en climas fríos, remoción de otros tipos de contaminantes como metales o compuestos químicos. El 25% restante corresponde a humedales naturales o artificiales de flujo superficial, conservación de humedales naturales y publicidad sobre compañías dedicadas a la construcción de estos sistemas. La gran mayoría de las páginas consultadas fueron realizadas por entidades de educación superior o entidades gubernamentales de los Estados Unidos como la EPA.

Algunos investigadores y estudiantes de posgrado dedicados al estudio de los humedales artificiales han construido páginas de Internet para difundir la información sobre sus grupos de trabajo y experimentos y han recabado grandes cantidades de ligas que contienen

información sobre los humedales. Las páginas que más información presentan son las de dos estudiantes Lloyd Rozema (Rozema, 1999) de Canadá y James Payton (Payton, 1999) de Estados Unidos.

Dos páginas de Internet que contienen una lista muy detallada de bibliografía publicada sobre los humedales artificiales son: "Constructed wetland information and information sources" (http://users.erds.com/wetland/Const_wet.html) e "Introduction to constructed wetland bibliography". Compilada por el Staff del departamento de agricultura de Estados Unidos (http://www.nal.usda.gov/wqic/Constructed_Wetlands_all/cwintro.html).

En el Reino Unido se ha diseñado un software que contiene referencias y resúmenes de cerca de 1000 humedales artificiales en todo el mundo, así como una base de datos de diseño y operación de los humedales artificiales construidos en ese país (Job et al, 1996). Este software se vende como complemento del libro "Reed Beds and constructed wetlands" (Cooper et al., 1996).

3.2.2 CUESTIONARIO- ENCUESTA

El objetivo del cuestionario- encuesta, fue recabar información sobre diferentes aspectos que involucran la investigación, construcción y operación de los humedales artificiales en México. El objetivo a largo plazo es tener una base de datos técnicos que puedan en un momento dado llegar a formar los criterios de diseño específicos para las condiciones del país. Para facilitar las respuestas y el manejo de información, el cuestionario contiene en su gran mayoría preguntas de opción múltiple. Como forma de convencimiento hacia las personas a las que fue dirigido, se les envió una invitación personal donde, además, se les indicaba que los resultados del mismo se les enviarían en caso de estar interesados en obtener la información generada.

Las preguntas del cuestionario- encuesta se pueden agrupar en tres principales grupos:

- a) Construcción de los sistemas
- b) Operación y mantenimiento de los sistemas
- c) Localización de más personas involucradas con los sistemas de humedales artificiales.

a) CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS

En este apartado se contempla obtener información sobre: tipos de diseño, costos, materiales empleados en la construcción, tipo de agua residual tratada, problemas encontrados durante la construcción y soluciones.

b) OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS

En este apartado se solicitó información sobre: eficiencias logradas en la depuración del agua residual, costos de operación y mantenimiento, problemas encontrados durante la operación y soluciones a la misma, así como condiciones extremas de operación.

c) LOCALIZACIÓN DE MÁS PERSONAS INVOLUCRADAS CON LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

En especial una de las preguntas del cuestionario iba dirigida a localizar más personas involucradas en la construcción de los humedales artificiales en México y poder enviarles este cuestionario.

3.2.3 OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

En algunas ocasiones solo se logró obtener algunos comentarios personales sobre el trabajo con los humedales artificiales de algunas de las personas contactadas.

3.3 RESULTADOS DEL CUESTIONARIO- ENCUESTA

El grupo de control del cuestionario- encuesta, fueron los compañeros del mismo proyecto de humedales artificiales del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA) de la Facultad de Química de la UNAM. Con ellos se revisó la dificultad de las preguntas realizadas y el tiempo requerido para su resolución, que es aproximadamente de 5 a 10 minutos.

De un total de 19 cuestionarios enviados (sin contabilizar nuevamente los enviados a una misma entidad educativa, gubernamental, o compañía) solo dos personas lo respondieron completamente:

- ◆ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua. Persona contactada: Rosario Díaz.
- ◆ UAM Iztapalapa. Persona contactada: Oscar Monroy.

Dos contactados quedaron en un futuro de enviar la información:

- ◆ Municipio de Oaxaca a través del Tecnológico de Oaxaca persona contactada: Oliverio González Alafita
- ◆ Cervecería Modelo

Seis contactados respondieron parcialmente el cuestionario o no pudieron proporcionar la información requerida o completa:

- ◆ Universidad Autónoma de Chapingo, persona contactada: Marco Antonio Belmont
- ◆ Comunidad el Copal, Irapuato Guanajuato, persona contactada: Jacques Eduard Tiberghien
- ◆ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) persona contactada: Armando Rivas.
- ◆ Compañía ECO RED, persona contactada: Aurelio Ahumada
- ◆ Tecnológico de Monterrey persona contactada: Javier Ernesto Boisselier Guerrero.
- ◆ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional - Unidad Oaxaca. Persona contactada: Pedro López Garrido.

Los motivos por lo que no cuentan con la información son:

- El proyecto está en su fase inicial y se desconoce la mayor parte de la información como en el caso del Proyecto "Instruct" de la Universidad Autónoma de Chapingo (Belmont, 1999).
- Por diferentes problemas relacionados principalmente con la construcción no ha entrado en operación el sistema (Tiberghien, 1999).
- Solo se han dedicado a difundir la información vía manuales de construcción, evaluación económica de estos sistemas y a dar asesorías para resolver problemas operativos de sistemas en funcionamiento (Rivas, 1998).
- Manejan los datos de diseño como secreto industrial, además de no tener datos de su comportamiento una vez construidos ya que no tienen la infraestructura para realizarlo (Ahumada, 1999).
- No se pudo localizar a la persona o personas involucradas en el proyecto. Cuando no se localizaba al responsable de alguna publicación se contactó a la entidad encargada de la publicación de la misma. Aunque respondieron ya sea enviando el mensaje a otras personas que ellos consideraron podrían tener la información requerida o enviando ligas de otros sitios en Internet donde se podría solicitar información sobre la persona en cuestión, la búsqueda resultó infructuosa como en el caso del Tecnológico de Monterrey.
- Solo mandó un resumen de la información que él posee, ya sea porque la obtuvo personalmente o porque el Instituto estatal del agua de Oaxaca, se la proporcionó (López-Garrido, 1999a)

De 9 cuestionarios no se tuvo respuesta alguna, como son:

- ◆ Gerencia estatal del agua Tlaxcala
- ◆ DUMAC
- ◆ Instituto estatal del agua de Oaxaca
- ◆ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, de Saltillo Coahuila,
- ◆ ENEP Iztacala
- ◆ UAM Azcapotzalco
- ◆ General Motors de México
- ◆ Comunidad Huehuecoyotl en Morelos
- ◆ Fundación el Manantial. Casa autosuficiente.

Algunos de los motivos por los cuales no se obtuvo respuesta son:

- La persona involucrada en el proyecto dejó de trabajar en la institución.
- Desconocen la información sobre diseño y construcción, ya que fue otra la institución responsable de realizar el diseño. Como en el caso de la casa autosuficiente localizada en el parque ecológico de Loreto y Peña Pobre.
- No desean difundir los datos obtenidos ya que las plantas de tratamiento han tenido problemas técnicos.
- En la actualidad se está desarrollando un manual de construcción y operación con los datos generados por el sistema de tratamiento ubicado en Santa Cruz Quilehtla, Tlaxcala. La entidad encargada de desarrollarlo es el IMTA (López-Moreno, 1999).

3.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

El análisis de la información recopilada bibliográficamente, por medio de los cuestionarios y comunicaciones personales, dio como resultado poder generar el desarrollo histórico de los humedales artificiales en México y la división de los sistemas construidos por grupos de trabajo.

3.4.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN MÉXICO

A pesar de que Foidl (1997) menciona que en la 5th Conferencia Internacional sobre "Sistemas de Humedales" en Viena, él observó que entre México y Brasil no se conoce y mucho menos se han implementado los sistemas de tratamiento de aguas con base en humedales artificiales, en México se han realizado estudios sobre estos sistemas desde 1988 (Luján, 1997).

Los primeros estudios experimentales con humedales construidos fueron realizados en México en la década de los 80, se trató de humedales artificiales del tipo de Sistemas de plantas de libre flotación utilizando lirio acuático principalmente. Los más conocidos son los sistemas empleados en el lago de Texcoco y el de Jiquilpan Michoacán. Los sistemas de flujo subsuperficial se empezaron a instalar en nuestro país por iniciativa de DUMAC (Ducks Unlimited de México, A.C.) a finales de la década de los 80's (De Garza, 1990). El primero se construyó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, de Saltillo Coahuila y el segundo para un fraccionamiento del Infonavit en Linares, N. L. El objetivo de ambos es tratar las aguas residuales domésticas generadas y reusarlas en el riego de parcelas.

A principios de la década de los 90's dos instancias universitarias realizaron estudios encaminados a evaluar este tipo de sistemas en el país. Por parte de la UNAM en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales (ENEP) de Iztacala y por parte de la UAM en las unidades de Azcapotzalco e Iztapalapa. En 1992 el (IMTA) realizó para la Comisión Nacional del Agua (CNA) un manual de construcción y diseño de humedales artificiales cuya base fueron manuales escritos en el extranjero, pero sin adaptar la tecnología a las condiciones del país (Rico et al., 1992; Colli, 1997; Rivas, 1997 y 1998). De ahí siguieron los estudios realizados en la Facultad de Química de la UNAM, en Chihuahua por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y en Guanajuato por el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Guanajuato (ICA). A excepción de la planta a gran escala construida por la ENEP Iztacala para tratar el agua residual generada por el rastro municipal de Pachuca Hidalgo y, el sistema experimental desarrollado por la Facultad de Química para tratar las aguas residuales provenientes del procesado del maíz, todos los sistemas manejan aguas residuales de tipo doméstico o una mezcla de doméstico-industriales.

A nivel estatal las dependencias de la CNA de los estados como la Gerencia estatal de Tlaxcala y el Instituto estatal del agua de Oaxaca se han dedicado a construir y operar este

tipo de plantas de tratamiento a gran escala (Herrera et al., 1997; Rivas, 1998; López-Garrido, 1999; López-Moreno, 1999).

En el ámbito particular, muy pocas compañías han mostrado interés en la construcción de estos sistemas debido principalmente a que económicamente no son muy redituables, un ejemplo de ello es Eco-Red (Ahumada, 1999) que construyó un sistema en Xcaret, Can Cun para tratar el agua residual generada en un centro de diversiones. Las plantas que crecen en el humedal son aprovechadas para alimentar a los caballos que utilizan en el espectáculo ecuestre de dicho centro.

A continuación se presenta la información obtenida por los diferentes grupos de trabajo.

3.5 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CONSTRUIDOS POR DUMAC

Gloria T. de Garza (1990, Luján, 1997) en colaboración con DUMAC, se encargó de la construcción y diseño de los primeros sistemas de humedales artificiales, todos de flujo horizontal. Su trabajo se encaminó al diseño de plantas a gran escala para tratar el agua residual de tipo doméstico en Unidades Habitacionales. Los estudios a nivel experimental los enfocó al uso de los humedales artificiales como sistema para tratar las aguas de un río para potabilizarlas posteriormente y al empleo de los humedales como sistema terciario en el tratamiento de aguas industriales. Puesto que no se localizaron publicaciones posteriores, se desconoce la situación actual de los sistemas.

En la tabla 13 se enumeran los sistemas que se construyeron o estaban en proceso de construcción y algunas de sus características.

3.6 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA UNAM

La UNAM como institución educativa tiene la función de investigar y desarrollar nuevas tecnologías apropiadas para el país, que puedan aplicarse en las comunidades y resuelvan problemáticas nacionales logrando mejorar sus estándares de vida.

Es por ello que desde principios de la década de los 90's se han realizados estudios encaminados a entender el comportamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de humedales artificiales con las condiciones de clima y materiales existentes en el país. Dos instituciones universitarias son las que se han involucrado directamente en este tipo de estudios: la ENEP Iztacala, y la Facultad de Química de la UNAM.

3.6.1 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ENEP IZTACALA

La ENEP Iztacala ha realizado estudios en sistemas a nivel experimental y escala real. El grupo de apoyo extranjero que colaboró con ellos se localiza en el departamento de zoología del museo de historia natural de Londres, Inglaterra. Los primeros estudios realizados con los sistemas de humedales artificiales fueron desarrollados en Inglaterra en la planta piloto del Water Research Center en Stevenage, Herts y en un sistema a escala laboratorio en Audlem Cheshire. El objetivo de las primeras investigaciones fue estudiar la eficiencia de remoción de amibas de vida libre incluyendo especies patógenas y su morfología (Rivera et al., 1991). El investigador a cargo fue: Fermín Rivera.

Los objetivos de sus investigaciones en México fueron (Rivera et al., 1992, Rivera y Calderón, 1993):

1. Determinar la precisión con que las plantas piloto pueden predecir o reflejar el comportamiento de las plantas a gran escala.
2. Investigar la ecología y el papel de los protozoos en el proceso y, particularmente cómo podrían ellos efectuar la remoción de bacterias patógenas.
3. Comparar la eficiencia con la cual se eliminan del agua residual los microorganismos patógenos cuando se utilizan diferentes tipos de substratos para la construcción de los lechos.
4. Determinar la eficiencia del sistema para la remoción de amibas patógenas del efluente.
5. Determinar el funcionamiento operativo de los lechos pilotos en clima tropical y subtropical para predecir cómo funcionarían esos mismos lechos a gran escala dentro de estas condiciones climáticas.
6. Comparar cuán económico resulta el sistema de tratamiento a base de humedales artificiales, si se le compara con los estanques de estabilización que son otra alternativa para México.

Los resultados obtenidos de sus experimentos los llevaron a la construcción de un humedal a escala real para tratar las aguas residuales generadas en el rastro municipal de Pachuca Hidalgo.

Las tablas 14 y 15 muestran las principales características de diseño y los resultados condensados de los sistemas tipo experimental y del sistema a gran escala construido para tratar el agua residual del rastro municipal de Pachuca.

3.6.2 ESTUDIOS REALIZADOS DENTRO DE LA FACULTAD DE QUÍMICA DE LA UNAM

El Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, ha desarrollado este tipo de sistemas a nivel experimental y planta piloto. Colabora con instituciones Austriacas y Alemanas para la implantación de este tipo de sistemas con tecnología desarrollada en el país (Luna-Pabello et al., 1997, 1997a y 1997b; Haberl, 1999). El investigador responsable del proyecto es: Víctor M. Luna-Pabello.

Los objetivos del proyecto son (Luna-Pabello et al., 1997, 1997a y 1997b):

1. Desarrollar e implantar esta tecnología con los recursos existentes en el país en comunidades rurales y suburbanas.
2. Obtener información para generar las bases de diseño propias para el país y optimizar los sistemas.
3. Obtener un efluente con calidad acorde a la normatividad nacional vigente en materia de descarga de aguas residuales y reúso del agua tratada.
4. Investigar las aplicaciones de los sistemas de humedales artificiales en descargas de agua residuales de tipo industrial.

Para alcanzar los objetivos se ha realizado lo siguiente:

1. Se realizaron estudios experimentales para encontrar el sustrato más adecuado con el cual obtener los porcentajes de remoción de contaminantes deseados tanto para agua doméstica como para el agua residual generada en el procesado de maíz (Ramírez, 1998; Krishnan et al., 1998)
2. Se realizaron estudios a nivel experimental para observar las eficiencias de remoción obtenidas en efluentes del procesado del maíz provenientes de un reactor RBR con diferentes tipos de combinación sustrato plantas (Krishnan et al., 1997)
3. Se construyó el sistema tipo piloto ubicado en las instalaciones del Vivero Forestal de Coyoacán para tratar una porción de las aguas residuales conducidas por el Río Magdalena y reutilizarla en el riego de las plantas del vivero. Además, de obtener parámetros útiles de diseño, operación y mantenimiento en el humedal, cumple una función educativa y de divulgación al demostrar las bondades del sistema a personas que visitan el Vivero y autoridades gubernamentales.
4. Se encuentra en construcción un humedal artificial de flujo vertical, para tratar las aguas residuales generadas por un área de oficinas dentro de la zona cultural de Ciudad Universitaria. Este sistema no solamente resolverá la problemática de la zona ya que también servirá como ejemplo para emplear este tipo de sistemas en otras zonas que no se encuentran conectadas al drenaje dentro y fuera de la Universidad. Se espera que para el primer bimestre del año 2000 se termine su construcción y se inicie la operación del mismo

En la tabla 16 se presentan las características y resultados de los sistemas experimentales y en la tabla 17 los datos de diseño de las plantas piloto de flujo vertical y la de flujo horizontal así como los resultados obtenidos con ésta última.

En la figura 17 se muestra al humedal horizontal, en la foto de la izquierda se observa el crecimiento alcanzado a un año por los carrizos y en la foto de la derecha el arreglo de tubería empleada para la alimentación del influente. La figura 18 es un esquema mostrando al humedal vertical que se encuentra en construcción en la zona cultural de Ciudad Universitaria

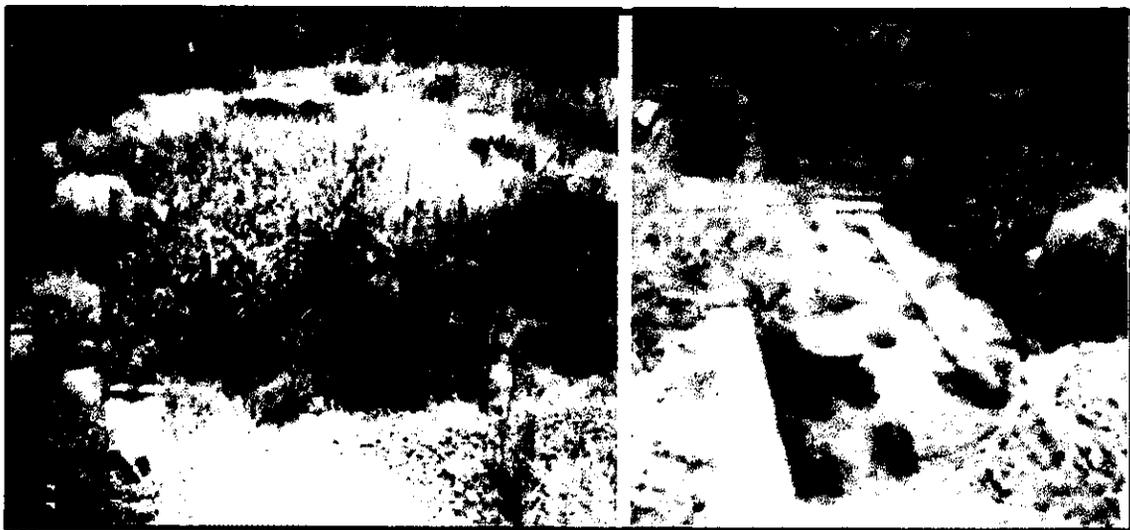


FIGURA 17. VISTA POSTERIOR (a la izquierda) Y TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN (a la derecha) DE LA PLANTA PILOTO TIPO HAFH LOCALIZADA EN LOS VIVEROS DE COYACÁN

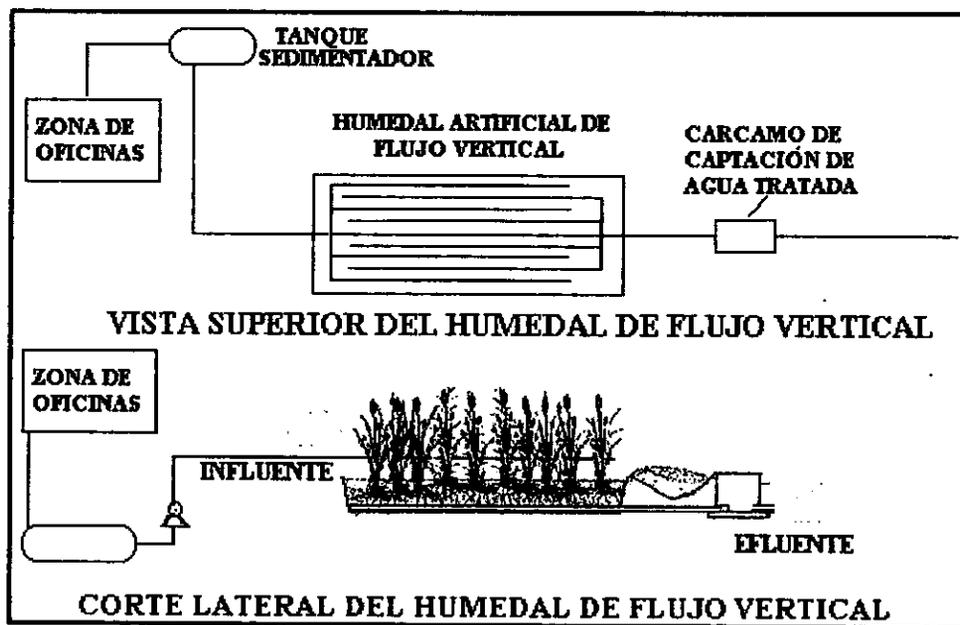


FIGURA 18. DIAGRAMA MOSTRANDO AL HAFV QUE SE CONSTRUYE EN LA ZONA CULTURAL DE CIUDAD UNIVERSITARIA

3.7 ESTUDIOS REALIZADOS POR LA UAM

La UAM realizó estudios a nivel laboratorio y planta piloto a principios de la década de los 90's, tanto en las instalaciones de la UAM Azcapotzalco como en las instalaciones de la UAM Iztapalapa. Los principales investigadores encargados del proyecto fueron por la UAM Azcapotzalco Isabel Kreiner y por la UAM Iztapalapa Oscar Monroy (Monroy, 1999).

La última publicación que generaron data de 1995 y en la actualidad no realizan estudios sobre los humedales artificiales.

Sus objetivos de estudio eran (González et al., 1990; Kreiner et al., 1992):

1. Estudiar el uso de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de unidades habitacionales a pequeños poblados.
2. Estudiar las eficiencias de remoción de contaminantes empleando distintos tipos de suelo y plantas que puedan tener un valor económico.

Los resultados obtenidos y características de diseño de los sistemas se resumen en la tabla 18 para los estudios de laboratorio y en la tabla 19 para la planta piloto.

La figura 19 es un diagrama de los dos módulos pilotos construidos para realizar sus investigaciones. La figura de la izquierda corresponde al sistema ubicado en la UAM Iztapalapa y el de la derecha al sistema ubicado en la UAM Azcapotzalco. Las figuras marcadas como (A) representan vistas superiores y la marcadas como (B) son cortes longitudinales de los mismos.

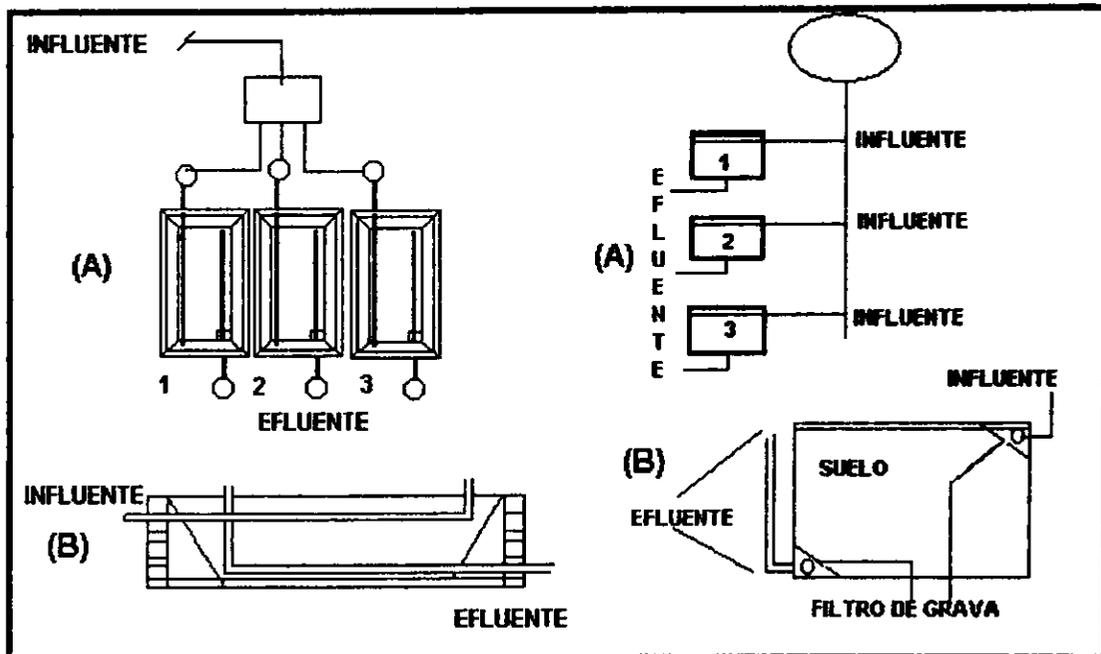


FIGURA 19. VISTA SUPERIOR Y CORTE LONGITUDINAL DEL MÓDULO PILOTO (a la izquierda) Y DEL MÓDULO DE LABORATORIO (a la derecha) CONSTRUIDOS POR LA UAM (Modificado de Kreiner et al., 1992).

3.8 ESTUDIOS REALIZADOS POR LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ CHIHUAHUA

La Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua (UACJ), construyó una planta piloto para tratar las aguas residuales que corren por el gran canal de aguas negras ubicado

en el parque residencial Puerta del Sol. La investigadora encargada del proyecto fue: Rosa Inés Durón. En estos momentos la persona encargada es Rosario Díaz (Díaz, 1999).

El organismo extranjero que colaboró con ellos fue la Universidad Estatal de Nuevo México, Estados Unidos, dentro del "Program Manager Environmental Systems Southwest Technology Development Institut" (SWTIDI) el investigador responsable es Walter Zachritz. Este proyecto es un subproyecto del proyecto principal denominado: "Artificial Wetlands as a Low-Cost treatment alternative for complex organic wastewater" (Zachritz y Lundie, 1995).

Los objetivos del proyecto fueron (Zachritz y Lundie, 1995):

1. Desarrollar esta tecnología en el país empleando los recursos disponibles en el área, como alternativa de las plantas de tratamiento convencionales.
2. Evaluar la remoción de nitrógeno en el sistema.
3. Monitorear la temperatura en el sistema y observar el impacto de la misma en la eficiencia de remoción de contaminantes al disminuir la actividad de las plantas.

En la tabla 20 se muestra un resumen con los datos proporcionados por Rosario Díaz (1999).

3.9 ESTUDIOS REALIZADOS POR EL INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS DE LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

El ICA de la Universidad de Guanajuato se localiza en la comunidad del "Copal", en Irapuato, Guanajuato. Desde 1995 se empezó el diseño y construcción de una planta tipo humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la comunidad, pero por cuestiones políticas, de idiosincrasia de la población, de tenencia de la tierra, mala selección de proveedores, problemas económicos y falta de drenaje para conducir las aguas residuales hacia el humedal, la construcción no ha concluido y en consecuencia, el sistema no ha entrado en operación. El responsable del proyecto inicialmente fue J. M. Cabrera Sixto y en la actualidad es Delfino Francia. En un inicio la universidad de Texas les proporcionó apoyo diseñando el tanque Imhoff para recibir las aguas residuales que la comunidad genera (Tiberghien, 1999).

El Humedal construido va a funcionar como humedal subsuperficial de flujo horizontal. El efluente del humedal proviene de un tanque Imhoff que funciona como tratamiento primario. Aunque en el diseño inicial no se requería del uso de una bomba para alimentar el humedal, al tener que cambiar la ubicación inicial del proyecto, surgió la necesidad de tender una línea de cableado. Al parecer el nuevo apoyo gubernamental con el que cuentan, hará que en corto plazo pueda entrar en funcionamiento. En la tabla 21 se muestran algunas características del diseño proporcionadas por Tiberghien (1999) y reportadas en Internet por Francia (1995).

3.10 HUMEDALES CONSTRUIDOS POR EL INSTITUTO ESTATAL DEL AGUA EN OAXACA.

En Oaxaca el Instituto estatal del agua ha sido el encargado de diseñar y construir los humedales artificiales existentes. En 1997 reportan el arranque de un humedal de flujo subsuperficial en Cuicatlán, Oaxaca y mencionan la construcción en un futuro de 4 sistemas más (Herrera et al., 1997).

López-Garrido (1999) comenta que al parecer todos los sistemas construidos en Oaxaca son de flujo vertical ya que la alimentación del influente es de forma superficial y el efluente esta ahogado, controlado por un codo móvil a la salida. (Este comentario indicaría más bien que se trata de sistemas de flujo horizontal). Por último menciona que no existen proyectos ni planos y que se han presentado problemas operativos generados por el diseño y la operación.

En la Tabla 21 se presentan los datos proporcionados tanto por López-Garrido (1999a) como los reportados por Herrera et al. (1997).

En la figura 20 se puede observar uno de los humedales artificiales construidos en Oaxaca.



**FIGURA 20. FOTO DE UNO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CONSTRUIDO EN OAXACA
(Fuente López-Garrido, 1999)**

TABLA13. SISTEMAS CONSTRUIDOS POR DUMAC

UBICACIÓN	TIPO DE AGUA RESIDUAL QUE TRATA	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	FLUJO DE AGUA TRATADA	REÚSO DEL AGUA	OBSERVACIONES	REFERENCIA
Saltillo Coahuila Universidad Autónoma Agraria Narro	Domésticas de la Universidad (incluyendo internado y laboratorios)	1988	3.5 lps	Riego de parcelas	N.D.	De Garza, 1990 Luján, 1997
Linares Nuevo León Fraccionamiento INFONAVIT	Domésticas	1988	N.D.	Riego de parcelas	No funciona en su totalidad por el desvío de las aguas residuales realizado por los ejidatarios	De Garza, 1990
Linares Nuevo León Fraccionamiento Campestre "Cerro Prieto"	Domésticas	N.D.	N.D.	N.D.	En construcción ocho sistemas con carrizos en el año de la publicación	De Garza, 1990
Nuevo León, Sisteleón	Domésticas	1989	N.D.	N.D.	En construcción en el año de la publicación	De Garza, 1990
China Nuevo León, Río San Juan	Agua de río	1989	N.D.	Tratamiento previo antes de entrar a la planta potabilizadora	Planta tipo experimental	De Garza, 1990
Coahuila, Complejo Ramos Arizpe de General Motors	Efluente de la planta de lodos activados que trata la mezcla de aguas domésticas y de proceso	N.D.	N.D.	Reúso en la planta de ensamble y motores	Planta tipo experimental	De Garza, 1990

N.D.. No se reporta el dato.

TABLA 14. SISTEMAS TIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADOS POR LA ENEP IZTACALA

LUGAR	OBJETIVOS	DURACIÓN DEL ESTUDIO	COMBINACIÓN SUBSTRATO-PLANTAS (Condiciones climáticas)	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA EXPERIMENTAL
<ul style="list-style-type: none"> ▪ México, D.F: Jardín Botánico de Ciudad Universitaria. ▪ San Luis Potosí Tangamanga I. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Determinar la eficiencia de remoción de los sistemas de humedales artificiales, para un rango de microorganismos patógenos incluyendo bacterias, protozoos y helmintos. ❖ Comparar las eficiencias de remoción empleando diferentes plantas, sustratos y condiciones climáticas ❖ Evaluar las posibilidades de establecer los sistemas de humedales artificiales en las zonas tropicales y subtropicales de México ❖ Comparar los resultados obtenidos con el sistema a gran escala localizado en el Audlem Sewage Treatment Works, in Cheshire, Reino Unido 	1 año. 1993	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ciudad de México: (tropical y subtropical) Suelo y <i>Phragmites</i> Grava y <i>Phragmites</i> Suelo sin plantas ▪ San Luis Potosí: (subtropical) Suelo y <i>Typha</i> Grava y <i>Typha</i> Suelo y <i>Phragmites</i> Grava y <i>Phragmites</i> Suelo sin plantas 	Reactores de plástico acrílico conforme al diseño del Water Research Center de Inglaterra. Los envases se llenaron hasta una altura de 60 cm con combinaciones del sustrato en proporciones iguales

FLUJO DE AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN	REFERENCIA
40 l/día	<ul style="list-style-type: none"> • El porcentaje de remoción más alto de materia orgánica lo tuvo el sistema suelo- <i>Phragmites</i>. • El porcentaje de remoción de materia orgánica menor lo tuvo el sistema suelo-<i>Thypha</i>. • Se obtiene una disminución significativa en la remoción de bacterias totales y <i>E coli</i>, aunque variable. Las principales causas de variación son: el sustrato, las condiciones de operación, climáticas y la presencia de las plantas. • Todos los sistemas presentaron efluentes con bajos contenidos de amibas de vida libre. • Los protozoos y los helmintos fueron eliminados del efluente. 	DBO promedio 60%, DQO promedio 25% Coliformes totales del 35-91% Coliformes fecales 35-90%	Robles et al., 1993 Rivera et al., 1992 Rivera et al., 1995

TABLA 15. SISTEMA TIPO PLANTA A GRAN ESCALA DESARROLLADO POR LA ENEP IZTACALA

LUGAR	OBJETIVO	DURACIÓN DEL ESTUDIO	DIMENSIONES	SUBSTRATO
Rastro Municipal de Pachuca, Hidalgo	❖ Tratar las aguas residuales con alta carga orgánica, generadas en el rastro de Pachuca empleando un humedal artificial de flujo horizontal	1 año agosto 1994 a julio de 1995	50 *12 *0.6 m Largo, ancho, profundidad.	Grava

TIPO DE PLANTAS	DENSIDAD DE PLANTAS/m ²	TIPO DE SISTEMA	PRETRATAMIENTO	USO DEL AGUA TRATADA
Carrizos y Tule	4 plantas/m ²	Secundario, HAFH	Biodigestor que funciona como tanque de sedimentación y un estanque anaerobio de estabilización. Su función es eliminar los sólidos más gruesos	Irrigación de un vivero de árboles y plantas ornamentales.

RESULTADOS	PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DURANTE EL ESTUDIO			REFERENCIA
		INICIO	FIN	
<ul style="list-style-type: none"> Al año del estudio el sistema todavía no alcanzaba su madurez. La detección de algunos patógenos bacterianos indicó que <i>Salmonella</i> y <i>Shigella</i>, pueden estar presentes en el efluente durante los cuatro primeros meses de operación, mientras que <i>Vibrio cholerae</i> es completamente eliminado desde el inicio. <i>Salmonella</i> se elimina a partir del octavo mes. 	%DBO	80	97	Rivera et al., 1996 Gutiérrez, 1999
	%DQO	87.76	97	
	%SS	89.00	100	
	% N org.	73.6	74.88	
	Coliformes fecales	87.76	99.5	

TABLA 16. SISTEMAS EXPERIMENTALES DESARROLLADOS POR LA FACULTAD DE QUÍMICA

LUGAR	OBJETIVO	TIPO DE PLANTAS	SUBSTRATO	TIPO DE SISTEMA DIMENSIONES	DURACIÓN DEL ESTUDIO	RESULTADOS	REPORTÓ
Ciudad Universitaria	❖ Evaluar la conductividad hidráulica y eficiencia de remoción en columnas empacadas	Sin plantas	Gravilla, Escoria volcánica	Columnas de cloruro de polivinilo de: 60 * 10.5 cm	100 corridas	La escoria volcánica presentó mejor eficiencia de remoción de contaminantes en comparación con la gravilla	Ramírez et al., 1997
Ciudad Univeristaria	❖ Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica y evaluación del tiempo de residencia hidráulico en un reactor empacado con escoria volcánica ❖ Establecer las bases de diseño para un HAFH a escala piloto.	Sin plantas	Escoria volcánica de granulometría : 8-16 mm parte inicial 4-8 mm parte media 0.5-4 mm zona final	Reactor experimental a escala de laboratorio de 0.395* 0.99* 0.35 cm ancho, largo, alto Volumen total = 154.4 l	25 días	La eficiencia depurativa del sistema disminuyó conforme aumentó el volumen del influente	Ramírez, 1998
Ciudad Universitaria	❖ Tratar el agua residual del procesado de maíz generada por el efluente de un reactor RBR	- <i>Phragmites australis</i> - <i>Typha latifolia</i> , - <i>Scirpus californica</i>	Grava de 5 a 10 mm y suelo	50*70*40 cm alto, largo ancho	7 semanas	DQO 80% N 80-85% P 53-85% SST 95-97%	Krishnan et al., 1997

TABLA 17. SISTEMAS PILOTO DESARROLLADOS POR LA FACULTAD DE QUÍMICA

LUGAR	OBJETIVO	FECHA DE CONSTRUCCIÓN	AÑOS DE OPERACIÓN	TIPO DE AGUA QUE TRATA	DIMENSIONES
Vivero Forestal de Coyoacán	❖ Tratar las aguas residuales del río Magdalena para su reúso en riego de las plantas del vivero forestal	1997-1998	uno 1998-1999	Mezcla de aguas residuales doméstica-industrial	Área total= 75 m ² 15 * 5* 0.6m largo-ancho-profundidad. Relación largo-ancho 1:3
Zona Cultural Ciudad Universitaria	❖ Tratar las aguas residuales de un conjunto de oficinas que no están conectadas al drenaje	En construcción desde 1998	N.A.	Doméstica.	Área total= 15 m ² 4*3*1.4 m largo-ancho-profundidad. Relación largo-ancho 1:3

SUBSTRATO	TIPO DE PLANTAS	DENSIDAD DE PLANTAS / m ²	COSTO TOTAL	PRETRATAMIENTO	TIPO DE SISTEMA	FLUJO DE AGUA RESIDUAL
Escoria volcánica por zonas de: 4- 8 mm influente 8-16 mm intermedio 4-8 mm efluente	Carrizos y Papiros de Pantano	1-2	No se puede estimar con precisión por la zona en la que se ubica el terreno	Rejillas y fosa séptica	Secundario HAFH	3.92 m ³ /d mínimo 5.6 m ³ /d de operación
Escoria volcánica por zonas de: 12-16 mm 8-12 mm 4-8 mm 0.5-4 mm > 16 mm < 0.5 mm	Carrizos y tule	2	N.A.	Fosa séptica y sedimentador	Secundario HAFV	0.6 m ³ /d mínimo 0.7 m ³ /d máximo

Continuación.....

TABLA 17. SISTEMAS PILOTO DESARROLLADOS POR LA FACULTAD DE QUÍMICA

RESULTADOS	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN	PROBLEMAS DE CONSTRUCCIÓN Y OPERATIVOS	REFERENCIA
<ul style="list-style-type: none"> ▪ TRH teórico de 1.7 días ▪ p. e. = 37. ▪ A la fecha los carrizos presentan una altura de más de 3 m y se han desarrollado completamente cubriendo en su totalidad la superficie del humedal ▪ El humedal cumple sus funciones de ser un lugar de visita y divulgación de la ecotecnología y de proporcionar agua tratada para el riego de las plantas del vivero forestal 	<p>A enero de 1999 los porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos eran:</p> <ul style="list-style-type: none"> %DQO = 50% %DBO₅ = 60% %SS = 100% %SDT = 17% %NH₃-N = 39% %NO₃-N = 54% %PO₄-P = 42% %P TOT = 17% %Mesofilas aerobias = 99.7% % Salmonella = 99.88 % Shigella = 99.83 %Coliformes totales = 99.89% %Coliformes fecales = 99.91% 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En el diseño original la alimentación del humedal se realizaría por un canal ya existente que se utiliza para el riego de las plantas y por el cual se conducían aguas residuales. Al ser un problema potencial de contaminación, las autoridades del Vivero decidieron ya no alimentar por el canal agua residual, solamente agua potable por lo que se tuvo que adaptar una bomba al sistema para transportar las aguas residuales desde el río Magdalena ▪ La primera bomba empleada no era la adecuada para el manejo del agua residual por lo que ocasionaba que el sistema se dejara de alimentar durante temporadas largas, con el cambio de la bomba se eliminó el problema ▪ Estiaje prolongado y lluvias abundantes que alteraron al sistema en su etapa de arranque 	<p>Luna et al, 1998 Ramírez, 1998 Jiménez-Tovar, 1999 Millán-Hernández, 2000</p>
<p>Tiempo de retención hidráulico teórico de 24 h. N.A.</p>	<p>N.A.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El módulo inicial se construyó con concreto muy cerca de taludes de tierra que lo debilitaron, produciéndose cuarteaduras en las paredes y fondo del mismo, es por ello que se tuvo que colocar una geomembrana para evitar las infiltraciones 	<p>Fenoglio-Limón, 2000</p>

P.E. persona equivalente

N.A. No aplicable

N.D. no reportado

TABLA 18. SISTEMAS EXPERIMENTALES DESARROLLADOS POR LA UAM

LUGAR	OBJETIVOS	DURACIÓN DEL ESTUDIO	TIPO DE AGUA RESIDUAL ALIMENTADA	COMBINACIÓN SUBSTRATO-PLANTAS	DIMENSIONES DEL SISTEMA EXPERIMENTAL
UAM Azcapotzalco	❖ Encontrar una planta con alta capacidad depuradora y valor económico que permita adquirir ingresos. La planta identificada será sembrada en uno de los módulos piloto.	67 días	Combinación 1:1 de agua potable con agua residual del efluente primario de la planta de tratamiento de aguas residuales del Rosario	Módulo 1: Suelo de Azcapotzalco Módulo 2: Suelo y Azalea Módulo 3: Suelo y alcatraz	0.75*0.75*0.7 m largo, ancho, profundidad

FLUJO DE AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN		REFERENCIA	
		Suelo Azcapotzalco.	Azalea		
2.88 l/h. Carga hidráulica= 0.27 m ³ /m ² *d	<ul style="list-style-type: none"> • La azalea presenta eficiencias de remoción aceptables. • Se recomienda su uso como planta de ornato al crear un ambiente agradable, pero no para su lucro ya que provocaría problemas al sistema. • Durante el estudio tuvo un período de floración, su desarrollo en altura fue mínimo. • El alcatraz no soportó las condiciones a las que fue sometido 			Kreiner et al., 1992	
		%DQO	50.17		72.93
		%DBO	41.37		79.30
		%PT	7.23		60.04
		%NT	14.66		86.36
		%NH ₄ -N	8.3		95.31
		%NO ₃	92.5		98.86
%SST	63.99	82.79			

TABLA 19. SISTEMAS PILOTO DESARROLLADOS POR LA UAM

LUGAR	OBJETIVO	DURACIÓN DEL ESTUDIO	TIPO DE AGUA QUE TRATA	COMBINACIÓN SUBSTRATO-PLANTAS	DIMENSIONES
UAM Iztapalapa	❖ Observar los factores que afectan al sistema	67 días. Sin contar período de adaptación	Generada en la UAM Iztapalapa proveniente de un reactor UASB	Módulo 1: Suelo de Iztapalapa Módulo 2: Suelo y Tule	Área total 8 m ² 3 módulos de 2*1*1 largo, ancho, profundidad
UAM Iztapalapa	❖ Estudiar la influencia de los parámetros hidráulicos sobre la eficiencia de remoción de DQO y P ❖ Estudiar la eficiencia de remoción de una planta con valor comercial	Febrero 92- junio 93 Un año 4 meses	Generada en la UAM Iztapalapa proveniente de un reactor UASB	Módulo 1: Suelo de Iztapalapa Módulo 2: Suelo y Tule Módulo 3: Suelo y apio	Área total 8 m ² 3 módulos de 2*1*1 largo, ancho, profundidad

FLUJO DE AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN			REFERENCIA	
48.6 L/h Carga hidráulica = 0.27 m ³ /m ² d	<ul style="list-style-type: none"> El Tule obtuvo un buen porcentaje de remoción debido al rápido desarrollo que presentó, alcanzó una altura de 30 cm y se dieron 2 matas en 67 días 		Suelo Izt.	Tule	González et al., 1990 Kreiner et al., 1992	
		%DQO	57.5	90.79		
		%DBO	63.82	91.06		
		%PT	7.54	66.53		
		%NT	17.11	82.79		
		%NH ₄ -N	10.89	97.74		
		%NO ₃	73.99	97.85		
0.33 l/min Carga hidráulica mínima= 0.037 m ³ /m ² *15 h. Carga hidráulica máxima= 0.086 m ³ /m ² *15 h.	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo teórico de retención hidráulica de 18 h. El tule permite una mayor carga hidráulica y muestra una menor evapotranspiración que el apio y el suelo El tule que se encontraba en su segundo año de crecimiento alcanzó una altura de 3 m. El apio mostró un crecimiento normal alcanzando una altura promedio de 1.57 m. El apio puede ser empleado en los humedales artificiales ya que mostró tener tolerancia a las condiciones de humedad saturada Las eficiencias de remoción se corrigieron respecto a la carga hidráulica (C.H.) y a la concentración (Conc.) 		Suelo	Tule	Apio	Kreiner et al., 1993 Kreiner, 1995
		%DQO (C.H.)	76.8	70.9	68	
		%P (C.H.)	22.2	10.3	14.5	
		%DQO (Conc)	68	60.5	58.6	
		%P (Conc)	8	23	13	

TABLA 20. SISTEMA PILOTO DESARROLLADO POR LA UACJ

LUGAR	OBJETIVO	FECHA DE CONSTRUCCIÓN	AÑOS DE OPERACIÓN	TIPO DE AGUA QUE TRATA	DIMENSIONES
Parque residencial Puerta del Sol en Ciudad Juárez, Chihuahua	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Evaluar la remoción de nitrógeno ❖ Evaluar el efecto de la temperatura en las plantas y en la eficiencia de remoción de contaminantes ❖ Utilizar el agua residual para riego de las plantas del un parque 	1995	Se realizó el estudio en dos años pero el humedal continúa trabajando	Domésticas mezclada con industriales provenientes de maquiladoras	Área total= 96 m ² Profundidad máxima y mínima del lecho 2.06-0.5 m Relación largo ancho = 1.5 Pendiente = 0.5

SUBSTRATO	TIPO DE PLANTAS	DENSIDAD DE PLANTAS / m ²	COSTO TOTAL	COSTO DE OP. Y MANTENIMIENTO	PRETRATAMIENTO	TIPO DE SISTEMA	FLUJO DE AGUA RESIDUAL
Grava y Arena Distribución: 16 mm entrada 32 mm parte media 8 mm final	Carrizo	4	\$54,650.00 MN	\$13,532.00 MN	Retención de sólidos por rejillas	Secundario HAFH	3.78 m ³ /d 5 m ³ /d máximo

RESULTADOS	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN	PROBLEMAS DE CONSTRUCCIÓN Y OPERATIVOS	REFERENCIA
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La aceptación de la comunidad no fue favorable ya que no están acostumbrados al reúso de las aguas tratadas y pensaban podían causar enfermedades en los niños que juegan en el parque ▪ Tiempo de residencia hidráulico 3.5 días 	Nitrógeno total =20% N-NH ₄ =25.75% SST= 83% Coliformes fecales= 99.9%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Problemas en la construcción con la estabilidad de los taludes de la cama filtrante ▪ En operación la primera siembra de plantas se secaron al no adaptarse al agua residual ▪ Se tuvo que implementar un sistema de desinfección para mejorar el agua del efluente 	Díaz, 1999 Zachritz y Lundie, 1995

TABLA 21. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE LA COMUNIDAD EL COPAL

LUGAR	TIPO DE AGUAS A TRATAR	DIMENSIONES Y ARREGLO	REFERENCIA
Comunidad el Copal Irapuato, Guanajuato	Domésticas mezcladas con desechos de animales	7 celdas de 16 m* 5 m. Área total= 80 m ² Para tratar el agua generada por 1400 personas	Francia, 1995 Tiberghien, 1999

TABLA 22. HUMEDALES ARTIFICIALES CONSTRUIDOS EN OAXACA

LUGAR	FECHA DE INICIO DE OPERACIONES	p.e. SERVIDAS	DISEÑO NUMERO DE CELDAS	TIPO DE PRETRATAMIENTO APLICADO	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN				SUBSTRATO	PLANTAS
					DBO IN	DBO EF	SST IN	SST EF		
San Sebastián Tutla	1996	3,000	12	Rejillas, desarenador, reactor anaerobio	390	160	282	23	Grava de 1 1/2 a 4 inch	<i>Typha l.</i>
Puerto Escondido	1996	10,800	20	Rejillas, desarenador, reactor anaerobio	290	N.D.	198	91	Grava de 1 1/2 a 4 inch	<i>Typha l.</i>
San Antonio, Monterrey, S. Cruz	1997	120	1	Rejillas, desarenador, reactor anaerobio	360	N.D.	N.D.	N.D.	Grava de 1 1/2 a 4 inch	<i>Typha l.</i>
Fracc. Zapote, Sta. Maria Huatulco	N.D.	478	4	Rejillas, desarenador, reactor anaerobio	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	Grava de 1 1/2 a 4 inch	<i>Typha l.</i>
San Juan Bautista, Cuicatlán	1996	3600	12	Rejillas, desarenador, reactor anaerobio	396	122	617	118	Grava de 1 1/2 a 4 inch	<i>Typha l.</i>

N.D. No se reporta el dato; IN = INFLUENTE; EF = EFLUENTE

Fuente López-Garrido, 1999.

Todos tratan aguas de tipo municipal, presentan una profundidad de 0.7 m geometría rectangular de (26*14 m) y relación largo ancho 0.5:1

LUGAR	DIMENSIONES	AREA *p.e.	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	REFERENCIA
San Juan Bautista, Cuicatlán	Área total= 500 m ²	1.67 m ²	\$33.33 U.S.D * HAB.	Herrera et al., 1997

3.11 RESULTADOS GLOBALES

En total se han construido o se encuentran en proceso de construcción 19 sistemas de humedales artificiales a gran escala, 6 sistemas tipo piloto y a nivel experimental se han desarrollado otros 6. De 5 de los 19 sistemas a gran escala construidos, no se cuenta con información sobre ellos (Humedal artificial de Santa Cruz Quilethla Tlaxcala, Humedal artificial de Xcaret, Can Cún, el sistema de la casa autosuficiente de la Fundación el Manantial, el sistema en construcción en la Universidad Autónoma de Chapingo y el humedal de la Cervecería Modelo). Esto hace un total de 31 sistemas localizados, 25 del tipo HAFH y aparentemente 6 del tipo HAFV.

El tipo de agua residual que se ha aplicado a los sistemas es doméstica, mezcla de doméstica- industrial, industrial, proveniente de un rastro, proveniente de un río y del procesado de maíz.

Los humedales se han empleado como sistemas primarios, secundarios, terciarios y como pretratamiento de agua de río.

Los humedales se han construido en 4 diferentes tipos de climas: tropical, subtropical, templado- subhúmedo y desértico- árido.

El pretratamiento aplicado al influente de los humedales artificiales es predominantemente mecánico ya que se usaron rejillas, desarenadores, fosas sépticas, sedimentadores, tanques Imhoff, aunque también se utilizaron biodigestores, estanques y reactores anaerobios.

Las plantas empleadas fueron: Carrizos (*Phragmites*), Tules (*Thypha*), Juncos (*Scirpus*), Papiros de pantano, azaleas, alcatraces y apio. De las cuales, tanto el carrizo como el tule presentaron eficiencias aceptables de remoción de contaminantes. Mientras que la azalea y el apio son dos buenas opciones para ser plantadas en la parte final del humedal, no se recomienda el uso del alcatrác, ya que no se adapta a las condiciones de humedad saturada del lecho.

Los substratos utilizados son: grava, arena, suelo del lugar y escoria volcánica.

Los resultados obtenidos en las plantas piloto y en la planta a gran escala del rastro de Pachuca, demuestran, que las condiciones climáticas y los tipos de materiales existentes en el país favorecen el uso de esta ecotecnología. Los sistemas alcanzan niveles de remoción de contaminantes aceptables en menor tiempo a los de los países con climas fríos.

El reúso del agua tratada es principalmente para el riego de áreas verdes, plantas de ornato o de un vivero Forestal, aunque también en forma experimental, se empleó en la línea de producción de una industria o como pretratamiento en una planta potabilizadora

Se encontraron problemas similares en la construcción de los humedales artificiales. Por ejemplo, se presentaron problemas con los taludes del terreno que al mojarse dañaron las estructuras del humedal artificial o del tanque Imhoff. Esta problemática se presentó en los

sistemas construidos en Ciudad Juárez, Chihuahua, el de la Zona cultural de Ciudad Universitaria y el de la comunidad del "Copal", en Irapuato, Guanajuato.

La reubicación del sistema generó la necesidad de incluir una bomba para alimentar las aguas residuales, no contemplada inicialmente en el diseño, como en el caso de la Comunidad el "Copal".

Los principales problemas operativos se derivan de modificaciones al diseño original. Este fue el caso del HAFH del vivero forestal de Coyoacán, que al no poder ser alimentado por canal, se tuvo que conectar una bomba al sistema. La bomba presentó fallas operativas, por lo que el humedal no se alimentó constantemente y en consecuencia, el tiempo de estabilización del sistema aumentó. Este inconveniente se solucionó al cambiar de tipo de bomba.

Otro tipo de problemas se presentaron al no adaptarse las plantas a la alimentación del agua residual, o por la calidad microbiológica del efluente. La solución fue replantar y adicionar un paso de desinfección.

Se encontró que los sistemas de Ciudad Juárez y el del vivero forestal de Coyoacán son similares, ambos tratan una mezcla de aguas residuales doméstico- industrial provenientes de un río contaminado; sus dimensiones son parecidas y el reúso del agua tratada es en ambos casos para riego.

A pesar de que están en operación sistemas a gran escala como los humedales de Oaxaca y Tlaxcala, la información generada al respecto no se ha difundido y es muy limitada. Por comentarios de personas que han estado en contacto con estos sistemas, se sabe que en los humedales de Oaxaca tuvieron dificultades operativas. Estas fallas son producto de copiar los sistemas extranjeros, sin tomar en cuenta las condiciones del país (Rivas, 1998). La consecuencia global es la desconfianza en el uso de esta ecotecnología, por personas que tienen la capacidad de toma de decisiones y pueden apoyar su implantación.

Dada la información obtenida, la generación de criterios de diseño aún no es posible, por lo que es necesario encaminar las investigaciones a la obtención de este tipo de parámetros.

CAPITULO IV: APLICACIONES POTENCIALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL EN MEXICO

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior mostraron que en México, los sistemas de humedales artificiales en su mayoría solo tratan aguas domésticas y con una sola excepción, dentro de los sistemas a gran escala, han sido utilizados para depurar otros tipos de aguas residuales como las generadas en un rastro.

Es por ello que en este capítulo se proponen las aplicaciones potenciales de los humedales artificiales en el país.

4.1 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CON FINES EDUCATIVOS

Aunque el propósito principal de los humedales artificiales es depurar aguas residuales de tipo doméstico y algunos tipos de aguas industriales, también pueden tener fines educativos al ser sitios visitados por el público. En especial, se puede dirigir la información a los niños sembrando las bases para la aceptación de este tipo de tecnología (Gelt, 1997).

La visita a un humedal artificial causa gran asombro a quien la realiza, ya que no solo se observa el tratamiento que reciben las aguas residuales, también, la interacción de aves, insectos y en algunas ocasiones fauna silvestre, en un medio estéticamente agradable y, crea el interés de su implantación en las comunidades. En consecuencia, al constatar sus bondades, los funcionarios que toman decisiones en el ámbito gubernamental y privado, pueden cambiar su actitud respecto a esta ecotecnología.

4.2 APLICACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN COMUNIDADES SEMIURBANAS Y RURALES

Existen en México numerosas comunidades semiurbanas o rurales, la mayoría de las cuales no poseen un sistema de alcantarillado y mucho menos un sistema de tratamiento de aguas residuales. En algunas comunidades las aguas residuales simplemente se dejan fluir por canales hasta fosas donde son captadas o se deja que el agua se infiltre hacia el subsuelo y, en la mayoría de las ocasiones son empleadas para el riego de campos de cultivo. Esta práctica es origen de las enfermedades gastrointestinales que tantos problemas ocasionan al país (Rivera y Calderón, 1993), al contaminarse tanto el suelo, el subsuelo, los mantos freáticos (Gallegos et al., 1999) y el aire (Shuval et al., 1989) por microorganismos patógenos que provocan la proliferación de mosquitos y malos olores que van en detrimento de la calidad de vida de la población.

Dadas las características de clima, disponibilidad de terreno en áreas rurales y materiales de construcción en el país, los humedales artificiales son una alternativa viable para aplicarse en comunidades pequeñas a medianas (Luna-Pabello et al., 1997). En este tipo de comunidades, la implantación de sistemas convencionales del tipo biológico o químico,

CAPITULO IV: APLICACIONES POTENCIALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL EN MEXICO

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior mostraron que en México, los sistemas de humedales artificiales en su mayoría solo tratan aguas domésticas y con una sola excepción, dentro de los sistemas a gran escala, han sido utilizados para depurar otros tipos de aguas residuales como las generadas en un rastro.

Es por ello que en este capítulo se proponen las aplicaciones potenciales de los humedales artificiales en el país.

4.1 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES CON FINES EDUCATIVOS

Aunque el propósito principal de los humedales artificiales es depurar aguas residuales de tipo doméstico y algunos tipos de aguas industriales, también pueden tener fines educativos al ser sitios visitados por el público. En especial, se puede dirigir la información a los niños sembrando las bases para la aceptación de este tipo de tecnología (Gelt, 1997).

La visita a un humedal artificial causa gran asombro a quien la realiza, ya que no solo se observa el tratamiento que reciben las aguas residuales, también, la interacción de aves, insectos y en algunas ocasiones fauna silvestre, en un medio estéticamente agradable y, crea el interés de su implantación en las comunidades. En consecuencia, al constatar sus bondades, los funcionarios que toman decisiones en el ámbito gubernamental y privado, pueden cambiar su actitud respecto a esta ecotecnología.

4.2 APLICACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN COMUNIDADES SEMIURBANAS Y RURALES

Existen en México numerosas comunidades semiurbanas o rurales, la mayoría de las cuales no poseen un sistema de alcantarillado y mucho menos un sistema de tratamiento de aguas residuales. En algunas comunidades las aguas residuales simplemente se dejan fluir por canales hasta fosas donde son captadas o se deja que el agua se infiltre hacia el subsuelo y, en la mayoría de las ocasiones son empleadas para el riego de campos de cultivo. Esta práctica es origen de las enfermedades gastrointestinales que tantos problemas ocasionan al país (Rivera y Calderón, 1993), al contaminarse tanto el suelo, el subsuelo, los mantos freáticos (Gallegos et al., 1999) y el aire (Shuval et al., 1989) por microorganismos patógenos que provocan la proliferación de mosquitos y malos olores que van en detrimento de la calidad de vida de la población.

Dadas las características de clima, disponibilidad de terreno en áreas rurales y materiales de construcción en el país, los humedales artificiales son una alternativa viable para aplicarse en comunidades pequeñas a medianas (Luna-Pabello et al., 1997). En este tipo de comunidades, la implantación de sistemas convencionales del tipo biológico o químico,

generan gastos que no se pueden cubrir y, cuando son instaladas, en el mejor de los casos trabajan con bajas eficiencias de remoción de contaminantes o bien son abandonadas.

Los humedales artificiales ofrecen especiales beneficios en tierras áridas, donde la gente se ve obligada a hacer un uso sabio de sus recursos de agua potable. Ese tipo de comunidades pueden utilizar el efluente del humedal para siembra de cultivos, la piscicultura y riego de áreas verdes, disminuyendo el uso de agua potable para estos propósitos (Gelt, 1997). La figura 21 es un esquema que muestra la posible aplicación en las comunidades. El arreglo presentado es hipotético, ya que como se mencionó previamente en el capítulo 2 el tipo de sistema a elegir depende de los requerimientos de la comunidad.

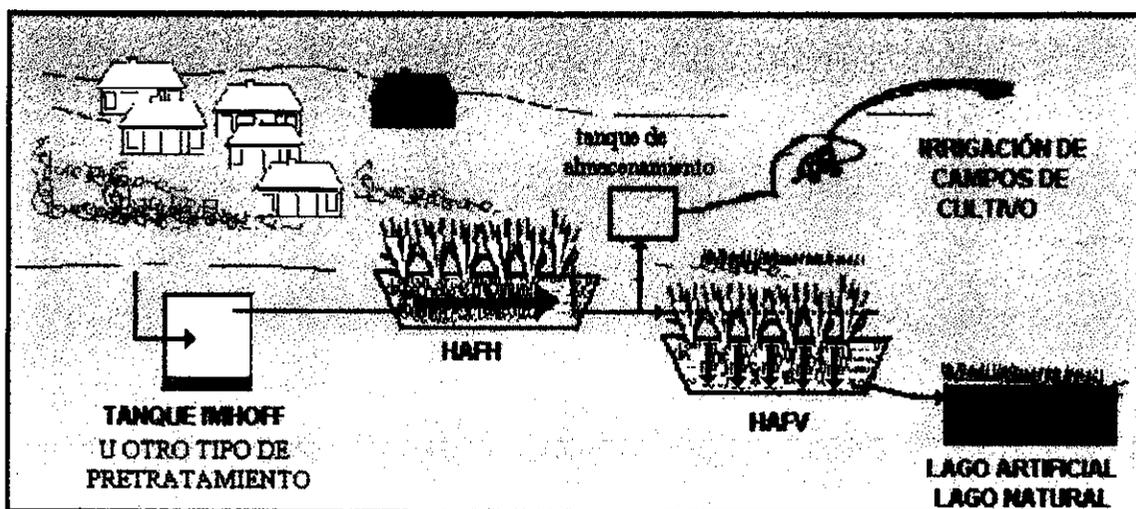


FIGURA 21. ARREGLO HIPOTÉTICO A EMPLEAR EN LAS COMUNIDADES RURALES Y SEMIURBANAS

En la figura 21 se propone como primer paso un pre-tratamiento mecánico, en este caso un tanque Imhoff. El primer humedal es del tipo de flujo horizontal, esto es con el fin de aprovechar parte del efluente para la irrigación de campos de cultivo, ya que contiene cantidades de nitrógeno y fósforo que las plantas pueden aprovechar. El efluente del HAFH se divide para alimentar un humedal artificial de flujo vertical y un tanque de almacenamiento del agua tratada. El tanque de almacenamiento funcionaría como reservorio del agua residual a emplear en las labores agrícolas y como paso de desinfección, en caso de así requerirse. Dentro de las características a considerar en el diseño del HAFV se propone el empleo de un substrato que elimine el fósforo y con ello evitar la posibilidad de eutroficación de los lagos artificiales o naturales en los cuáles se descarga el efluente.

Para la implantación de este tipo de sistemas se propone que las comunidades consideren los siguiente aspectos, donde se describen los requerimientos mínimos necesarios para la realización del proyecto y con ello evitar su fracaso:

1. Detección por la comunidad de la necesidad de tener un sistema de tratamiento de sus aguas residuales así como de los beneficios generados. Si la comunidad no está convencida de los beneficios que va a obtener puede obstruir el proyecto. En el caso de los sistemas a base de humedales artificiales existen beneficios secundarios, al utilizar las plantas para hacer artesanías o como forraje para alimentar a los animales. También se puede emplear en la parte final del tratamiento flores, plantas de ornato o con un valor comercial, como petunias, rosas, azucenas, flor de lis, palmeras, orejas de elefante, azalea y apio (Gillete, 1996b; Kreiner, 1992 y 1993), que al ser comercializadas generan divisas para la comunidad. Un sistema conteniendo plantas de ornato en la parte final del proceso se presenta en la figura 22.
2. Detección por la comunidad del uso que desean dar al agua residual tratada, ya que no solamente la pueden emplear para riego, también es posible utilizarla en la piscicultura o generar lagos artificiales que tendrían propósitos recreativos.
3. Determinar si disponen de un lugar apropiado para la construcción del sistema y la comunidad está dispuesta a donar o vender ese terreno para evitar problemas en la posesión de la tierra. En caso de no contar con sistema de drenaje, diseñarlo de tal manera que las aguas residuales de la comunidad lleguen a los humedales artificiales sin necesidad de equipo de bombeo.
4. Detectar qué tipo de material de construcción y plantas dispone la comunidad que puedan ser empleados en la construcción de los humedales artificiales.
5. Determinar el flujo, características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales generadas en la comunidad. Por lo regular, en las comunidades rurales a semiurbanas el agua residual es una combinación de agua de lluvia, agua de tipo doméstico, proveniente de desechos animales y de pequeñas industrias alimentarias que se localicen en la comunidad, esto aunado al pobre suministro de agua potable con el que cuentan, genera aguas residuales con alta carga orgánica hasta de más de 400 mg/l de DBO_5 .
6. Tipo de suelo y de ser posible un análisis estratigráfico.

Con esta información las comunidades pueden solicitar apoyo a instancias gubernamentales y educativas dedicadas al desarrollo de los sistemas de humedales artificiales, para el diseño y construcción de los mismos de acuerdo a sus necesidades y expectativas.

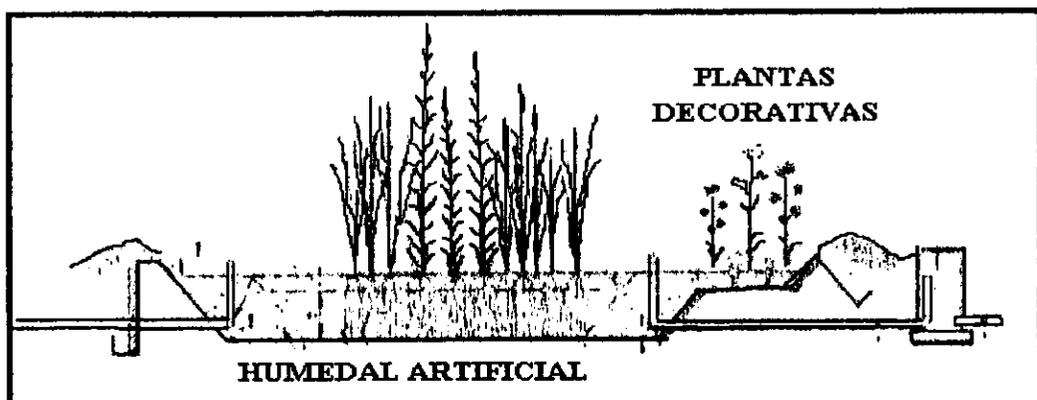


FIGURA 22. SECCION LONGITUDINAL DE UN HAFH DONDE SE MUESTRA LA INSTALACION DE PLANTAS DE ORNATO EN LA PARTE FINAL DEL TRATAMIENTO.

4.3 APLICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES PARA MEJORAR EL EFLUENTE DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO YA EXISTENTES

Los humedales artificiales también pueden ser empleados para mejorar la calidad de los efluentes generados por otros tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales, un caso particular es su uso en el efluente de sistemas a base de lagunas de estabilización.

En México son muy utilizados los sistemas a base de lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas residuales de comunidades rurales, pero generalmente este tipo de lagunas no son diseñadas ni operadas adecuadamente, por lo que, se convierten en zanjas profundas donde solamente son captadas las aguas residuales para posteriormente y sin ningún tratamiento, emplearlas en riego de cultivos sin cumplir con la norma nacional vigente NOM-003-ECOL-1997 que marca las especificaciones para el reúso del agua residual en riego agrícola.

En muchos casos, las paredes de este tipo de sistemas ni siquiera están impermeabilizadas, lo que origina la posible contaminación de sus aguas subterráneas. Al no tener el diseño adecuado, ya que se van ampliando conforme crece la población y, debido a la sensibilidad inherente de estos sistemas a cambios climáticos y cargas orgánicas (Moreno, 1991), la calidad del agua que se puede obtener es deficiente, es un posible foco de infección que genera malos olores, mosquitos y poco agradable a la vista. Un ejemplo se observa en la Figura 23 que corresponde a una laguna localizada en el Estado de México, en ella se puede observar la falta de impermeabilización de las paredes y en la parte posterior una tubería y una bomba para extraer las aguas residuales que son utilizadas en el riego de parcelas cercanas.



FIGURA 23. LAGUNA DE OXIDACIÓN LOCALIZADA EN EL ESTADO DE MEXICO.

En este caso, el uso de un humedal artificial como una etapa del tratamiento del efluente de este sistema es una posible opción, siendo la única función de la laguna la de servir

como sedimentador. En la figura 24 se muestra el posible arreglo laguna- humedal artificial que solucionaría este problema.

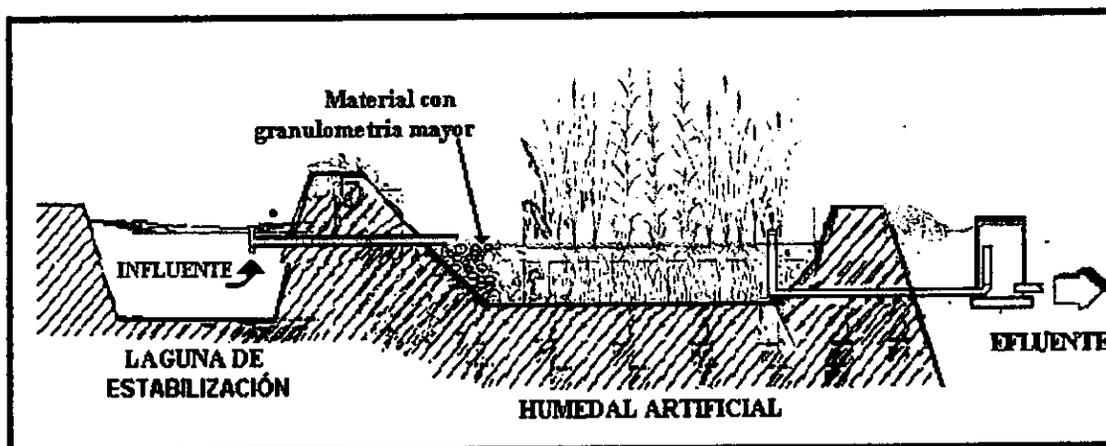


FIGURA 24. POSIBLE ARREGLO HAFH LAGUNA DE OXIDACIÓN

Al respecto se han realizado estudios donde se utilizan los sistemas de humedales como una etapa de remoción de algas y pulimento de las aguas residuales generadas por las lagunas de oxidación (Gschlöß et al., 1996). Los resultados son aceptables. Es importante colocar en la zona de alimentación grava o rocas de una granulometría mayor a la del resto del humedal artificial, para retener las posibles algas presentes en la alimentación y evitar el azolvamiento del sistema (Wolverton, 1986). Pero preferentemente es deseable que se considere antes de la construcción de lagunas de oxidación como la anteriormente citada, un humedal artificial. Las ventajas de los sistemas de humedales artificiales sobre los sistemas lagunares se describieron en el capítulo I de esta tesis.

4.4 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES

La composición de las aguas residuales en la mayoría de las industrias es una mezcla de agua de lluvia, agua de proceso y aguas domésticas generadas en los baños y comedores de las mismas, esto es debido a la poca conciencia que se tiene sobre el manejo adecuado de las aguas residuales y sus beneficios en cuanto a disminución del costo del tratamiento cuando estas se separan. Debido a la normatividad nacional vigente NOM-001-ECOL-1996, la mayoría de las compañías, tienen un plazo limitado de tiempo para darle un tratamiento a sus aguas residuales generadas antes de descargarlas a cuerpos receptores.

Aunque los humedales artificiales, en las industrias serían utilizados preferentemente como sistemas terciarios de pulimento de las aguas residuales tratadas en los sistemas de tratamiento biológicos o químicos ya construidos, también pueden ser utilizados como sistemas secundarios, especialmente en la industria alimenticia, donde la contaminación del agua presenta altas concentraciones de DQO, SST y nitrógeno (Kadlec et al., 1996). Se han reportado en influentes con valores de DQO y DBO_5 de 3600 mg/l y 900 mg/l respectivamente eficiencias de remoción del 92% y 90% respectivamente, empleando solamente dos HAFH (Vrhovsek et al., 1996).

En algunas compañías refresqueras, se emplea agua potable tratada químicamente para el lavado de los transportadores y el piso. El uso del efluente de un humedal artificial en la zona de prelavado ayudaría a disminuir el consumo de este tipo de agua y en consecuencia, el gasto en productos químicos. El influente del humedal se tomaría del agua de lavado de los tanques de almacenamiento del jarabe terminado. Además, dentro de su programa de visitas escolares a sus instalaciones, el humedal tendría funciones estéticas, educativas y como beneficio adicional cumplirían con su política de calidad al emplear tecnologías ambientalmente adecuadas.

En otro tipo de compañías no solo se interesan por cumplir con la normatividad nacional vigente, ellos también están interesados en mejorar la calidad de vida de sus trabajadores. El agua tratada por los humedales, la podrían utilizar para el riego de pastos de sus áreas deportivas o generar un estanque donde pueden sembrar peces para que los trabajadores cuenten con lugares de reunión agradables. Dependiendo del uso final del agua y las características del influente es el diseño de humedal artificial que se recomendaría. Si solo se empleara para riego, la mejor opción es un humedal de flujo horizontal. En caso de tratarse de un estanque, la opción más adecuada, es un humedal de flujo vertical, el arreglo sería parecido al presentado en la figura 21.

4.5 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA INDUSTRIA PETROLERA

En el caso de la industria petrolera, se reporta el uso de sistemas de humedales artificiales de flujo libre superficial como pulimento de sus efluentes de sus sistemas de tratamiento secundarios (Lichtfield, 1993; Kiss y Lakatos, 1996; Cole, 1998). Algunos estudios han demostrado la capacidad de los humedales artificiales para remover del agua residual doméstica compuestos orgánicos como benceno, tolueno, p-Xileno, cloroformo, tetracloroetileno (Wolverton, 1986). Pero debido a la complejidad de los hidrocarburos aromáticos, la toxicidad hacia las plantas y las limitaciones en la degradación anaerobia (Portier y Palmer, 1989), no se ha reportado el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de este tipo de aguas residuales. Zachritz (1999 y 1999a.) realizó estudios a nivel experimental sobre la degradación de ácido benzoico y tri y pentaclorofenol en sistemas experimentales de HAFH plantados con *Scirpus validus*, obteniendo buenos resultados, pero los sistemas a gran escala aún no se han desarrollado.

Al tener nuestro país su economía basada en el petróleo, es necesario eliminar la contaminación generada en la extracción y transporte de los hidrocarburos. Los pozos petroleros del país se encuentran en zonas tropicales, por lo que los humedales no solamente cumplirían con su función de tratar el agua residual, también servirían como zonas de recuperación de hábitats para la fauna silvestre.

4.6 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES Y LOS LAGOS ARTIFICIALES

Los sistemas de humedales artificiales son una excelente opción para tratar las aguas residuales de campos de golf, módulos deportivos o lugares de descanso. Las aguas tratadas se emplearían como agua de riego de los pastizales y en la creación de lagos artificiales, que junto con los sistemas de trampas de arena instalados en los campos de golf, son parte del diseño arquitectónico de los mismos. Para el caso de los módulos deportivos, hoteles y sitios de descanso, en los lagos artificiales se practicarían deportes como el canotaje, el remo y hasta la pesca deportiva, además de poseer un valor estético.

4.7 LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LAS CASAS HABITACIÓN.

Este es el uso más antiguo que han tenido los sistemas de humedales artificiales, aunque en México no se ha difundido. En Europa y Norteamérica se han construido principalmente en lugares remotos, en casas que no tienen conexión a los sistemas de drenaje como en las zonas boscosas, poblados alejados de las grandes ciudades o lugares donde por las características del suelo de la región es muy costoso la introducción de drenaje. Por lo regular en el país, en este tipo de lugares se han construido fosas sépticas cuyo efluente es de muy baja calidad.

En este caso los humedales artificiales podrían ser empleados considerando a las fosas sépticas como un paso de pre-tratamiento del agua residual. La figura 25 muestra una casa que tiene un humedal artificial en su patio. Se observa que es estéticamente agradable a la vista y en el caso particular de este sistema se emplearon plantas de ornato para hacerlo más atractivo.



FIGURA 25. CASA HABITACIÓN DONDE SE MUESTRA EN PRIMER PLANO EL USO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL (Fuente Onsite constructed wetlands, 1996)

4.8 PROPUESTA DE UNA MODIFICACIÓN A LOS SISTEMAS EXISTENTES DE HUMEDALES ARTIFICIALES

En la revisión bibliográfica realizada, no se encontró que en un mismo sistema una parte sea de flujo vertical y otra de flujo horizontal, a pesar de que es conocido que los sistemas híbridos son los más eficientes. En la figura 26 se muestra un diagrama hipotético mostrando este arreglo.

La primera parte que es donde se alimentaría el influente, sería de flujo vertical y la siguiente sección sería de flujo horizontal, con este arreglo se obtendrían los beneficios de los sistemas híbridos y una disminución en los requerimientos del área, reducción de las áreas de excavación e impermeabilización. Además, al redondear las partes laterales del lecho se reducirían las zonas muertas, aumentando la eficiencia depurativa del sistema.

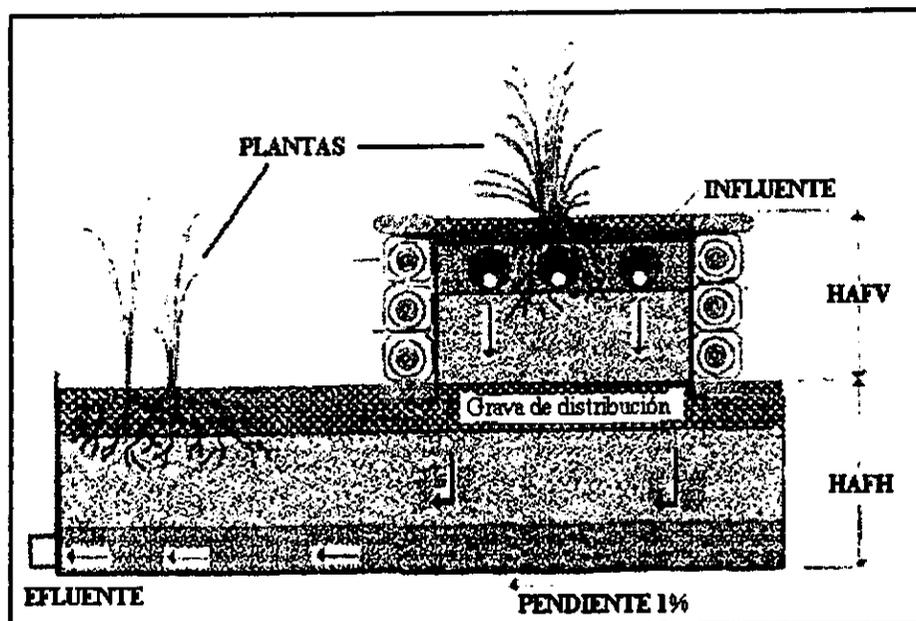


FIGURA 26. PROPUESTA DE ARREGLO HAFV Y HAFH EN UN MISMO SISTEMA.

Las aplicaciones potenciales pueden llegar a ser tan amplias, como el conocimiento sobre los sistemas de humedales artificiales vaya aumentando.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La revisión de los textos impresos y por medios electrónicos del desarrollo histórico de los humedales artificiales, llevó a encontrar las bases de su desarrollo histórico en culturas tan antiguas como la Egipcia, la China y la Azteca, en las observaciones realizadas en los humedales naturales y los estudios realizados por la Dra. Käthe Seidel hace más de 30 años. En la actualidad, esta ecotecnología ha establecido fuertes raíces en los países desarrollados y, en los países en vías de desarrollo, se encuentra en proceso de adaptación e implementación. Aunque experimentalmente, en algunos sistemas piloto y a gran escala se han aplicado muy diversos tipos de aguas residuales, la mayor parte de la información publicada, hace referencia al uso de los humedales artificiales en aguas residuales de tipo doméstico.

La descripción de las principales características funcionales de los sistemas de humedales artificiales, ayudó a comprender como las interacciones entre los diferentes componentes de los mismos, llevan a la remoción de los contaminantes del agua residual.

La diferenciación de los sistemas existentes, se realizó de acuerdo a la clasificación propuesta por Brix. Se encontró que la mayor parte de la información de diseño difundida es para los sistemas de plantas emergentes de flujo superficial y subsuperficial de flujo horizontal y que las líneas de investigación se dirigen a optimizar el diseño de estos dos sistemas, así como al desarrollo tanto de los humedales artificiales de flujo vertical como de los sistemas híbridos. Lo complicado de los sistemas y lo limitado de la información experimental, ha producido ecuaciones de diseño ideales, donde se considera a los sistemas de humedales artificiales como reactores ideales de flujo pistón, construyendo sistemas sobredimensionados.

Se realizó y distribuyó un cuestionario- encuesta con la finalidad de recabar la información generada sobre los sistemas de humedales artificiales construidos en el país. Este cuestionario no tuvo la aceptación esperada, ya que la mayor parte de las personas contactadas no lo contestaron, lo contestaron parcialmente o quedaron de enviar la información en el futuro. Esta falta de interés puede ser consecuencia de la desinformación y poca aceptación que hasta el momento ha tenido esta ecotecnología.

La recopilación bibliográfica de la información obtenida sobre el desarrollo histórico de los humedales artificiales en el país, dio como resultado observar que a más de 10 años de que se construyó el primer sistema, esta ecotecnología no se ha implantado y por lo tanto los datos obtenidos hasta el momento no son suficientes para generar criterios de diseño propios. Además, no se ha dado la importancia necesaria a la publicación de la información sobre estos sistemas, a pesar de que la mayoría de las instituciones educativas que los han estudiado, tienen entre sus objetivos el de divulgar la tecnología hacia las comunidades. En las pocas publicaciones existentes se observa que en general la información proporcionada es difusa y deficiente. Se sabe, por comentarios, que existen sistemas que han presentado fallas operativas al ser concebidos como copias de los sistemas extranjeros en lugar de adaptarlos a las condiciones del país. La consecuencia global de los hechos anteriores, es

que las personas que tienen la capacidad de toma de decisiones en el ámbito gubernamental y particular no apoyen su implantación y desconfíen de su uso.

Los HAFH es el tipo de sistema que principalmente se ha desarrollado y estudiado en el país, ya que son los sistemas de mayor uso en Europa y, sobre los cuales se tiene más información. En la actualidad, el estudio de humedales artificiales de flujo vertical es incipiente. El primer sistema tipo HAFV construido por la UNAM, aún no ha entrado en operación, pero se espera que para el primer bimestre del año 2000 se termine su construcción y se inicie la operación del mismo. En cuanto a los sistemas híbridos no se tiene noticias de su aplicación a nivel nacional.

Las aplicaciones potenciales de los humedales artificiales pueden ser muy vastas, ya que su empleo no se restringe al uso en casas habitación o comunidades rurales y semiurbanas, también se pueden emplear con fines educativos, en los efluentes de industrias, como pulimento de sistemas de tratamiento existentes o con fines puramente estéticos y de recuperación de hábitats.

RECOMENDACIONES

La implantación de los sistemas de humedales artificiales en las comunidades rurales, se debe realizar cuidadosamente, ya que las experiencias obtenidas hasta el momento, con algunos sistemas, no han sido del todo satisfactorias y pueden generar el rechazo de esta ecotecnología.

Un área de oportunidad en el desarrollo de los sistemas se encuentra en la remoción de microorganismos patógenos del efluente, ya que si bien es cierto que los porcentajes de remoción alcanzados son del 99.9%, no se cumple con la normatividad nacional vigente NOM-003-ECOL-1997, en cuanto al reúso del efluente en riego agrícola o lagos artificiales. La cloración del efluente no es una solución aceptable, debido a la formación de compuestos cancerígenos, por lo que es necesario la búsqueda de alternativas de desinfección que sean ambientalmente adecuadas y de bajo costo.

Otra área de oportunidad es el estudio de los humedales de flujo subsuperficial para tratar los efluentes de la industria petrolera, en la actualidad no se ha desarrollado y para nuestro país que basa su economía en la extracción del petróleo, puede ser de gran importancia.

Las líneas de investigación nacionales, deben estar enfocadas a la correcta apropiación de la ecotecnología, así como a la optimización del diseño y de las eficiencias de remoción de los humedales artificiales. La obtención de parámetros dentro de los sistemas en operación, servirá de base de datos para crear los criterios de diseño aplicables al país.

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA

1. Ahumada, A. 1999. Comunicación personal. Gerente general de la Compañía Eco-Red.
2. Bahlo, K y Wach, G. 1992. *Abwasserkenngroßen*. Naturnahe Abwasserreinigung. Planung und Bau von Pflanzenkläranlagen. Ökobuch, Verlag. Kassel, Alemania. pp 16-21
3. Bastian, R. K. y Hammer, D. A. 1993. *Capítulo 5: The use of constructed wetlands for wastewater treatment and recycling*. En: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Editado por Gerald A. Moshiri. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida. E.E.U.U.A. pp. 59-68
4. Bastian, R. K.; Shanagan, P. E y Thompson B. P. 1993. *Capítulo 22: Use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal- regulatory issues and EPA policies*. En: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Editado por Gerald A. Moshiri. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida. E.E.U.U.A. pp. 265-278
5. Batchelor, A. y Loots, P. 1997. *A critical evaluation of pilot scale subsurface flow wetland: 10 years after commissioning*. Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 5. pp 337-343.
6. Belmont, M. A. 1999. Comunicación personal. WEGP Environmental Science Center. Trent University. Ontario Canadá.
7. Best, E. 1999. *Phytoremediation of explosives in groundwater using constructed wetlands*. <http://www.wes.army.mil/el/resbrief/phytoexp.html>
8. Boon, A. G. 1985. *Report of a visit by members and staff of WRc to Germany to investigate the root zone method for treatment of wastewater*. WRc report 376-S/1, Stevenage, Reino Unido.
9. Börner, T. 1992. *Capítulo 2: Pflanzenkläranlagen in Mitteleuropa*. Tesis : Einflußfaktoren für die Leistungsfähigkeit von Pflanzen kläranlagen. Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung. Darmstadt, Alemania. pp 5-29.
10. Börner, T.; von Felde, K.; Gschlössl, T.; Gschlössl, E.; Kunst, S. y Wissing, F. W. 1998. *Germany*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Editado por: J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, y R. Haberl. Backhuys Publishers, Leiden, Paises Bajos. pp.169-189.
11. Bowmer, K. H. 1987. *Nutrient removal from effluents by an artificial wetland: Influence of rhizosphere aeration and preferential flow studied using bromide and dye tracers*. Wat. Res. Vol. 21, No. 5. pp 591-599
12. Brix, H. 1993. *Capítulo 2: Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal process and treatment performance*. En: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Editado por Gerald A. Moshiri. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida. E.E.U.U.A. pp. 9-22
13. Brix, H. 1994. *Capítulo 12: Vertical flow and multi-stage constructed wetlands*. En: *Role of wetlands for the control of pollution*. Cursos impartido por CHEAM-IAWQ. Zaragoza, España. pp. 226-246
14. Brix, H. 1994a. *Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status and future perspectives*. En: Reprint of paper presented at IAWQ Biental Conference Hungary. pp. 344-389

15. Brix, H. 1997. *Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?*. Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 5. pp 11-17.
16. Castillo, E. I.; Sánchez, V. C.; Castillo, V. G y Rosales, C. F. 1997. *Situación de la depuración de las aguas residuales Municipales en México*. En: Memorias Técnicas XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Tomo I. pp 456-462.
17. CNA. 1997. *Inventario nacional de plantas de tratamiento*. Subdirección general técnica. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. pp 26-29.
18. Cole, S. 1998. *The emergence of treatment wetlands*. Environmental Science and Technology. Vol. 12, No. 9. pp 218A-223A.
19. Collado, L. R. 1992. *Depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades*. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Colección Señor No. 12 Editorial Paraninfo S.A. Madrid, España. pp.49-72.
20. Collí, M. J. 1997. *Lecho de hidrófitas para el tratamiento de aguas residuales de comunidades rurales menores a 100 habitantes*. En: Tercer Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D.F. pp. 288.
21. Cooper, P. F. y Boon, A. G. 1986. *The use of phragmites for wastewater treatment by the root zone method: The U.K. approach*. En: Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery. Editado por K. R. Reedy y W. H. Smith. Magnolia publishing Inc. Orlando Florida, E.E.U.U.A. pp 152-174.
22. Cooper, P. F. 1993. Capítulo 21: *The use of reed bed systems to treat domestic sewage: the European design and operation. Guidelines for reed bed treatment systems*. En: Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Editado por Gerald A. Moshiri. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida. E.E.U.U.A. pp. 203-217.
23. Cooper, P. F.; y Green, M. B. 1995. *Reed Bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom. - The first 10 years experience*. Wat. Sci. Tech. Vol. 32, No. 3. pp 317-327
24. Cooper, P. F.; Job, G.B.; Green, M.B and Shutes R.B.E. 1996. *Reed Beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Seven Trent Water, U.K. pp 1-27
25. Cooper, P. F. 1999. *A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems*. Wat. Sci. Tech. Vol. 40, No. 3. pp 1-9
26. Crites, R. 1994. *Design criteria and practice for constructed wetlands*. Wat. Sci. Tech. Vol. 29, No. 4. pp 1-6
27. Chick, A. J. y Mitchell, D. S. 1995. *A pilot study of vertical flow wetlands at Coffs Harbour New South Wales, Australia*. Wat. Sci. Tech. Vol. 32, No. 3. pp 103-109.
28. De Garza, G. T. 1990. *Tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas*. Agua potable Vol. 66, No. 5. México. pp 34-38.
29. Díaz, R. 1999. Comunicación personal. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
30. Dugan, 1993 En: <http://www.geocities.com/Rainforest/7141/natural.htm>
31. EPA, 1993. *Chapter III: Design and construction considerations for subsurface flow constructed wetlands*. En: Guidance for design and construction of a subsurface flow constructed wetland. U.S. EPA- Región 6. Water management division municipal facilities branch technical section. pp 9-21
32. EPA, 1999. *How wetlands are defined and identified?*. <http://www.epa.gov/owow/wetlands/facts/facts11.html>

33. Fenoglio-Limón, F.E. 2000. *Tesis de licenciatura: "Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical"* En revisión. UNAM. México, D.F.
34. Foidl, N. 1997. *Humedales. Una alternativa viable a las lagunas de estabilización*. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. No. 35. Buenos Aires, Argentina. pp. 34-39.
35. Foidl, N. 1998. *Biofiltro*. Saneamiento y Medio Ambiente revista del Capítulo de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-CIP. Año 4, No. 9. Lima, Perú. pp.16-21
36. Francia, D. 1995. *Tratamiento de las aguas residuales de la comunidad rural "el Copal"*. Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Guanajuato. México. http://www.ugto.mx/Unidades_Académicas/ICA/22htm/proyect1.htm
37. Gallegos, E.; Warren, A.; Robles, E.; Campos, E.; Calderón, A.; Sainz, G.; Bonilla, P. y Escolero, O. 1999. *The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in México*. Wat. Sci. Tech. Vol. 40, No. 2, pp. 45-52.
38. García, J.; Romero, H.; Cervantes, J. M. y Romero, A. 1997. *El tratamiento de las aguas residuales de ciudades medianas, problemáticas y alternativas de solución*. En: Memorias Técnicas XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Tomo I. pp. 243-249
39. Gelt, J. 1997. *Constructed Wetlands: Using Human Ingenuity, natural processes to treat water, build habitat*. <http://128.196.42.70/AZWATER/arroyo/094wet.html>.
40. Gillete, B. 1996. *Simulating nature key to successful designs of constructed wetlands systems*. <http://www.datasync.com/~mullein/cwdesing.htm>.
41. Gillete, B. 1996a. *Green revolution in wastewater treatment faces growing pains*. <http://www.datasync.com/~mullein/cw.htm>.
42. Gillete, B. 1996b. *Home rock/plant wastewater filter: A flower bed that is more than just another pretty face*. <http://www.datasync.com/~mullein/homecw.htm>.
43. González, F.; Kreiner, I. y Noyola, A. 1990. *Pulimento de un efluente UASB con filtro biológico de plantas y suelo*. En: Memorias del VII Congreso nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Oaxaca, México. pp. C'14-C'15.
44. Gray, N.F. 1989. *Chapter 4: Plants and land treatment*. Biology of wastewater treatment. Oxford University Press. New York. EEUUA. pp. 493-501
45. Green, M. B. y Upton, J. 1995. *Constructed reed beds: appropriate technology for small communities*. Wat. Environ. Res., Vol.32, No.3. pp. 339-348.
46. Groudev, S.N.; Bratcova, S.G.; Komnitsas, K. 1999. *Treatment of waters polluted with radioactive elements and heavy metals by means of a laboratory passive system*. Mineral Engineering 12:(3). pp. 261-270
47. Gschlöbl, T.; Lederle, C.; Schleypen, P. y Melzer, A. 1996. *Small wetland systems for posttreatment and effluent polishing in lagoons*. En: 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. pp. VI/4-1 a VI/4-8
48. Gutierrez, S. A. 1999. *Tesis doctor en ingeniería ambiental: "Evaluación del método de la zona de la raíz en el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica"*. Facultad de Ingeniería UNAM.
49. Haberl, R. 1997. *Humedales construidos en Europa con énfasis en Austria*. En: Tercer Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D.F. pp. 219-232.
50. Haberl, R.; Perfler, R.; Laber, J. y Graber, D. 1998 *Austria*. En: Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Editado por: J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, y R. Haberl. Backhuys Publishers, Leiden, Países Bajos. pp.67-76.

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

51. Haberl, R. 1999. *Constructed wetlands: a chance to solve wastewater problems in developing countries*. Wat. Sci. Tech. Vol. 40, No. 3, pp.11-17
52. Hammer, D. A. y Bastian, R. K. 1989. *Capítulo 2: Wetlands Ecosystems: Natural water Purifiers?*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment Municipal, industrial and agricultural*. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 5-19
53. Hammer, D. A. 1993. *Capítulo 4: Designig constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution*. En: *Created and natural wetlands for controlling nonpoint source pollution*. Agencia de protección del ambiente de E.E.U.U.A. Editado por Richard K. Olson. C.K. Smoley. E.E.U.U.A. pp. 71-111
54. Hantzche, N. 1985. *Wetland systems for wastewater treatment: Engineering applications*. En: *Ecological considerations in wetlands treatment of municipal wastewaters*. Editado por P. Godfrey, E. Kaynor, S. Pelczarski, y J. Benforado. Van Nostrand Reinhold. New York, E.E.U.U.A. pp. 7-25
55. Hauke, C. J y José, P. V. 1996. *3.5 Water treatment systems*. En: *Reedbed management for commercial and wildlife interest*. Published by the Royal Society for the Protection of birds. The Lodye, Sandx. pp. 137-140.
56. Herrera, D.; Castellanos, M. A.; Zaragoza, J. L. y Díaz, A. 1997. *Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales de origen municipal*. En: *Memorias Técnicas XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*. Zacatecas, México. Tomo I. pp. 320-325
57. Hu, K. P. 1991. *Overview: Design of subsurface flow costructed wetland systems*. Shanghai Environ. Sci. Vol. 8, No. 9. pp. 7-12.
58. IMTA, 1997. *Informe final "Tecnologías de punta para el reúso de aguas residuales en México"*. Convenio SGP-IMTA. pp. 89-100.
59. Jiménez-Tovar, B. J. 1999. *Tesis de Licenciatura: "Construcción y arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo Humedal Artificial"*. UNAM. México, D.F.
60. Job, G.; Cooper, P. y Green M. 1996. *Reed Beds and constructed wetlands for wastewater treatment-Database versión 1.00*. Seven Trent Water WRc Reino Unido.
61. Johansen, N. y Brix, H. 1996. *Design criteria for a two-stage constructed wetland*. En: *5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Viena, Austria. pp. IX/3-1 a IX/3-8
62. Juwarkar, A. S. y Oke, B. 1995. *Domestic wastewater treatment through constructed wetland in India*. Wat. Sci. Tech. Vol. 29, No. 4 pp. 291-294.
63. Kadlec; R. H. 1996. *Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design*. En: *5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Viena, Austria. pp. X/1-1 aX/1-8.
64. Kadlec, R. H.; Burgoon, P. S.; Henderson, M. E. 1996. *Integrated natural systems for treating potato processing wastewater*. En: *5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Viena, Austria. pp. III/1-1 a III/1-8
65. Karpiscak, M.; Wass, R.; Freitas, R; y Hopf, S. 1999. *Constructed wetlands in Southern Arizona*. Airidlands newsletters No 45. <http://phylogeny.arizona.edu/OALS/ALNA/aln45/wetlands.html>.
66. King, A.C.; Mitchell, C. A. y Howes, T. 1996. *Hydraulic trecers studies in a pilot scale subsurface flow constructed wetland*. En: *5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Viena, Austria. pp. IV/4-1 a IV/4-8.

67. Kiss, M. K y Lakatos, G. 1996. *Operation of constructed wetland system for post-purification of oily sewage water*. En: 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. Poster 18.
68. Kreiner, I.; Hernández, S. y Salas, M. 1992. *Diseño y resultados preliminares de un filtro biológico con plantas y suelo*. En: Acciones para un ambiente limpio. Memorias del VII congreso nacional de la sociedad mexicana de ingeniería sanitaria y ambiental A.C: Cocoyoc, Morelos, México. pp. II
69. Kreiner, I.; Monroy, O.; Ayala, C. y Escalante; E. 1993. *La aplicación de tule y apio en el tratamiento de aguas residuales con el filtro de suelo con plantas - Primeros resultados*. En. Memorias del VIII Congreso de la SMISSAAC. México. pp. III-24 a III-28
70. Kreiner, I. 1995. *Sistemas "Naturales" para el tratamiento de aguas residuales - Sistemas de suelo con plantas*. En: Memorias del Segundo Minisimposio Internacional sobre remoción de contaminantes de aguas y suelos. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F. P.p. 110-119.
71. Krishnan, R.; Kneidinger, Ch.; Ríos, R.; Salinas, N.; Haberl, R. y Durán-de Bazúa, C. 1997. *El uso de macrófitas emergentes acuáticas soportadas en arena/grava para el tratamiento de aguas residuales industriales*. En: Tercer Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D.F. pp. 252-254.
72. Krishnan, R.; Ríos, R.; Salinas, N y Durán-de Bazúa, C. 1998. *Treatment of maize processing industry wastewater by percolating columns*. Environmental Technology. Vol. 19. pp. 1-8
73. Laber, J. y Haberl, R. 1997. *Two strategies for advanced nitrogen elimination in vertical-flow constructed wetlands*. Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 5, pp. 71-77
74. Lara, J. A. 1999. *Tesis de maestría: Depuración de aguas residuales urbanas mediante Humedales artificiales*. Cataluña, España. <http://looneytunes.acmecity.com/gossamer/111/index.htm>
75. Litchfield, D. K. 1993. *Constructed wetlands for wastewater treatment at Amoco Oil Company's Mandan, North Dakota refinery*. En: Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Editado por Gerald A. Moshiri. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida. E.E.U.U.A. pp. 485-488
76. López-Garrido, P. A. 1999. *Lechos de raíces para el tratamiento de aguas residuales municipales Estado del arte*. Ingeniería y Ciencias Ambientales. FEMISCA. Año 10. No. 43 pp. 10-15.
77. López-Garrido, P. A. 1999a. Comunicación personal. Centro Interdisciplinario de Investigación para el desarrollo Integral Regional-Unidad Oaxaca.
78. López-Moreno, A. M. 1999. Comunicación personal. Departamento de Comunicación social CNA. México, D.F.
79. Luján, I. 1997. *En busca de la tecnología que permita efectiva y económicamente controlar las descargas de residuales líquidos*. Calidad Ambiental Vol. III No. 4. ITESM. Campus Monterrey, Nuevo León, México. pp. 13-15
80. Luna-Pabello, V.M.; Durán, C.; Ramírez, H.; Fenoglio, F.; and Sánchez, H. 1997. *Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales*. Anuario Latinoamericano de Educación Química, ALDEQ. San Luis, Argentina. pp. 51-56.

81. Luna-Pabello, V. M.; Durán-de-Bazúa, M. del C.; Fenoglio-Limón, F. E. y Ramírez-Carrillo, H. F. 1997a. *Sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas a base de humedales artificiales. Una tecnología alterna para la protección del equilibrio ecológico en zonas urbanas*. Memorias de las III Jornadas Técnicas Panamericanas Desarrollo Urbano y Patrimonio Histórico. Zacatecas, Zacatecas. México. 10 pp.
82. Luna-Pabello, V. M.; Durán de-Bazúa, C.; Fenoglio-Limón, F.E. y Ramírez-Carrillo, H. F. 1997b. *La contribución de los humedales artificiales para el desarrollo de un mundo más racional y sano*. Memorias de la conferencia Internacional organizada por la Facultad de Química y Farmacia en el marco del XXX Aniversario de la Fundación de Universidad de Camagüey, Cuba.
83. Luna-Pabello, V. M.; Durán-de-Bazúa, M. del C.; Haberl, R.; Jiménez-Tovar, B. J.; Millán-Hernández, S.E.; Miranda-Ríos, M.; Ramírez-Carrillo, H. F. y Schaller, P. 1998. *Los Humedales artificiales, una ecotecnología viable para el tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos urbanos en México*. En II Simposium internacional "Gestión y tecnologías apropiadas para el agua en pequeños núcleos habitados". Barcelona, España.
84. Metcalf, E. y Eddy, C. 1996. *Capítulo 3: Sistemas de tratamiento naturales*. Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. Mc. Grau- Hill International Editions. México. pp. 1051-1149.
85. Millán-Hernández, S.E. 2000. *Tesis de licenciatura: "Operación de una planta piloto tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales y su uso en riego agrícola"*. UNAM. México, D.F.
86. Mitsch, W. y Gosselink, J. 1986. *Capítulo 1: Wetlands and wetland science*. En: Wetlands. Van Nostrand Reinhold. New York, E.E.U.U.A. pp. 3- 13
87. Monroy, O. 1999. Comunicación personal. UAM Iztapalapa.
88. Moreno, M. D. 1991. *Capítulo 3: Lagunas de estabilización*. En: Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de Operadores. Ministerio de obras públicas y transporte. Editorial Marfil, Madrid, España. pp. 29-37.
89. N.C. State University. 1999. *Constructed Wetlands*. <http://alexander.ces.state.nc.us/events/wetland.html>
90. Olguín, E. J.; Hernández E.; Coutiño, P. y González R. 1994. *Aprovechamiento de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales*. En tecnologías ambientales para el desarrollo sustentable. Instituto de ecología Xalapa, Veracruz. México. pp. 11-20
91. Olguín, E. J. y Hernández, E.. 1998. *Use of aquaticplants for recovery of nutrients and heavy metals from wasterwater*. Inter-American program for environmental technology cooperación in the key Industry sector. Roundtable on municipal water. Vancouver Canadá. Marzo 15-17. http://www.idrc.ca/industry/canada_e14.html
92. Onsite constructed wetlands. *Constructed wetlands page University of south Alabama Dep of civil Engineering*. <http://www.usouthal.edu/usa/civil/info2.htm>
93. Payton, J. 1999. *James Payton's constructed wetlands page*. <http://www.eng.edu/users/paytojd/wetland.html>
94. Phillips, V. 1997. *Anatomy of a constructed wastewater wetland*. <http://www.hort.agri.umn.edu/h5015/97papers/phillips.html>
95. Platzer, C. 1996. *Enhanced nitrogen elimination in subsurface flow artificial wetlands- a multi stage concept*. En: 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. pp. 1/7-1 a 1/7-9.

96. Platzer, C y Mauch, K. 1996. *Evaluations concerning soil clogging in vertical flow Reed Beds- Mechanims, Parameters, consequences andsolutions?*. En: 5Th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. pp. IV/2-1-IV/2-10.
97. Platzer, C y Mauch, K. 1997. *Soil clogging in vertical-flow reed beds - mechanisms, parameters, consequences and solutions*. Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 5, pp. 175-181
98. Portier, R. J. y Palmer, S. J. 1989. *Capítulo 6: Wetlands microbiology: Form, functions, processes*. En *Constructed wetlands for wasterwater treatment Municipal, industrial and agricultural*. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 89-105.
99. Powicki, C. R. 1997. *Constructed wetlands treat wastewater naturally*. EPRI Journal VOL. 22 No. 4. Julio/Agosto. E.E.U.U.A. pp.17-23. http://hubub.epri.com/EPRI_Journal/jul_aug97/p17.html
100. Ramírez, H.; Fenoglio, F.; Durán, C. y Luna-Pabello, V.M. 1997. *Evaluación de la conductividad hidráulica y eficiencia de remoción de materia orgánica en columnas empacadas con grava*. En: Tercer seminario internacional de expertos en el tratamiento de efluentes industriales y residuos. México, D.F. pp. 191-196.
101. Ramírez, H.1998. *Tesis de licenciatura: "Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal"*. UNAM. México, D.F.
102. Reed, S. C y Brown, D. S. 1992. *Constructed wetland design- the first generation*. Water Environment Research. Volumen 64 No. 6. pp. 776-781.
103. Rico, M.; Rivas A.; González, M. y Bahena, J. 1992. *Sistemas de tratamiento de aguas usando lechos de hidrófitas*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA). Jiutepec, Mor. México.
104. Rivas, A. 1997. *Uso de los lechos de plantas acuáticas como pulimento de efluentes del tratamiento de aguas residuales*. En: Tercer seminario internacional de expertos en el tratamiento de efluentes industriales y residuos. México, D.F. pp. 265 - 268.
105. Rivas, A. 1998. Comunicación personal. IMTA.
106. Rivera, F.; Curds, C. P.; Warren, A.; Ramírez, E.; Calderón, A.; Rodríguez, S. y Ortiz, R. 1991. *Pathogenic and free-living amoebae isolated from a wastewater treatment system with Phragmites australis (common reed)*. En: *Biological approach to sewage. Treatment process current status and perspectives*. Editado por P. Madoni. Perugia, Italia. pp. 123-125.
107. Rivera, F.; Ramírez, E.; Bonilla, P.; Rodríguez, S.; Calderón, A.; Gallegos, E. y Ortiz, R. 1992. *Determinación de la efectividad de un sistema de tratamiento biológico a base de carrizos y/o tules en la depuración del agua de desecho*. En: VII Congreso Nacional. Acciones para un ambiente limpio. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cocoyoc, Morelos México. pp. VII.
108. Rivera, F. y Calderón, A. 1993. *Biotratamiento de aguas negras*. Información Científica y Tecnológica. Vol. 15 núm. 203. CONACYT. México, D.F. pp. 12-15
109. Rivera, F.; Warren, A.; Ramírez, E.; Decamp, O.; Bonilla, P.; Gallegos, E; Calderón, A. y Sánchez, J. 1995. *Removal of pathogens from wasterwater by the root zone method (RZM)*. Wat. Sci. Tech. Vol. 32, No. 3, pp. 211-218.

110. Rivera, F.; Warren, A.; Curds, C.; Robles, E.; Gutiérrez, A.; Gallegos, E. y Calderón, A. 1996. *The application of the root zone method for the treatment and reuse of high-strength abattoir waste in México*. En: 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. pp. X/4-1 aX/4-7.
111. Robles, E.; Gallegos, E.; Calderón, A. y Sainz, M. 1993. *Sistemas de tratamiento de lechos de raíces. Remoción de materia orgánica*. Información Científica y Tecnológica. Vol. 15 No. 203. CONACYT. México, D.F. pp. 26-28
112. Röthlisberger, F. 1996. *Kickuth Reed Bed Technology – The situation in Switzerland with a comparison between technical wastewater treatment and Kickuth Reed Bed technology*. En: 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. Poster 36.
113. Rozema, L. 1999. *Lloyd Rozema's constructed wetland homepage*. <http://badger.ac.brocku.ca/~lr96ah/w.html>
114. Schaller, P. 1998. *Tesis: "Planning, construction and investigation of a constructed wetland for the secondary treatment of domestic wastewater in México city"*. Universidad BOKU, Viena, Austria.
115. Schiller, H. 1996. *Programa de implantación de técnicas naturales de tratamiento de efluentes con filtros Fito-Terrestres en la Provincia de Córdoba, República de Argentina*. En: Memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tratamiento de aguas residuales. Tomo II. México, D.F. pp. 547- 562.
116. Schiller, H. 1996a. *Programa de implantación de técnicas naturales de tratamiento de efluentes con filtros Fito-Terrestres en la Provincia de Córdoba, República de Argentina*. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. No. 28 Octubre. Buenos Aires, Argentina. pp. 53-61.
117. SEMARNAP. 1995. *Programa Hidráulico 1995-2000*.
118. Sereico, P. y Larneo, C. 1988. *Capítulo 27: Use of wetlands for wastewater treatment*. Civil engineering practice 5. Water Resources Environmental Technomic Publishing Co. Inc. E.E.U.U.A. pp. 767-787.
119. Serio, L. 1998. *Humedales: una pieza clave en el desarrollo sustentable*. EDUCYT año 2, número 69. Marzo. <http://www.de.fcen.uba.ar/prensa/educyt/1999/ed69b.htm>
120. Shival, H. I.; Guttman-Bass, N.; Applebaum, J. y Fattal, Badri. 1989. *Aerosolized enteric bacteria and viruses generated by spray irrigation of wastewater*. Wat. Sci. Tech. Vol. 21, No. 3. pp. 131-135.
121. Staubitz, W. W y Surface, J. M. 1989. *41c Potential use of constructed wetlands to treat landfill leachate*. En: Constructed wetlands for wastewater treatment Municipal, industrial and agricultural. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 747
122. Stengel, E. y Schultz-Hock, R. 1989 *Denitrification in Artificial Wetlands*. En: Constructed wetlands for wastewater treatment Municipal, industrial and agricultural. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 484-492
123. Tarutis, W. J. y Unz, R. F. 1994. *Using decomposition kinetics to model the removal of mine water pollutants in constructed wetlands*. Wat. Sci. Tech. Vol. 29, No. 4. pp. 219-226
124. Taylor, C.; Jones, D.; Yahner, J.; Ogden, M. y Dunn, A. 1998. *Constructed wetlands images 2*. En: Individual residence wastewater wetland construction in Indiana. Purdue University. <http://danpatch.ecn.purdue.edu/~epados/septics/cwetlnd2.htm>
125. The evergreen project. 1998. <http://www.mobot.org/MBGnet/fresh/wetlands/body.htm>

126. Tiberghien, J. E. 1999. Comunicación personal. Estudiante de intercambio Silsoe College- Universidad de Guanajuato. ICA (Instituto de Ciencias Agrícolas).
127. Universidad de Florida. 1999. *Aquatic and wetland plant particulars and photographs*. Aquatic plant information retrieval system. <http://aquat1.ifas.edu/ph-pe-po.html>
128. USDA. 1999. *Plants database*. National resource conservation service. <http://plants.usda.gov/plants/topics.html>.
129. von Felde, K. y Kunst, S. 1997. *N- and COD- removal in vertical flow systems*. Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 5. pp. 79-85
130. Vrhovsek, D.; Kukanja, V. y Bulc, T. 1996. *Constructed wetland for industrial waste water treatment*. Wat. Res. Vol 30 No 10. pp. 2287-2292.
131. Vymazal, J. 1998. *Introduction*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Editado por: J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, y R. Haberl. Backhuys Publishers, Leiden, Países Bajos. pp.1-15.
132. Vymazal, J.; Brix, H.; Cooper, P.; Haberl, R.; Perfler, R. y Laber, J.. 1998. *Removal mechanisms and types of constructed wetlands*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Editado por: J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, y R. Haberl. Backhuys Publishers, Leiden, Países Bajos. pp. 17-66
133. Water recycling. 1998. *Aquatic plants*.. Triangle school, wastewater treatment system <http://www.waterrecycling.com/Aqplants.htm>
134. Water recycling. 1998a. *Wetland plants*. Triangle school, wastewater treatment system <http://www.waterrecycling.com/wetplants.htm>
135. Watson, J. T. y Hobson, J. A. 1989. *Capítulo 30: Hydraulic design considerations and constructed wetlands for wastewater treatment*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment Municipal, industrial and agricultural*. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 379-391
136. Whalen, K.; Lombardo, P.; Wile, B. y Neel, T.. 1989. *Capítulo 39d: Constructed wetlands: Design, construction, and costs*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment Municipal, industrial and agricultural*. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 590-596
137. Whittar, S. R. 1993 *Capítulo 14: Wetland water treatment systems*. En: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Editado por Gerald A. Moshiri. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida. E.E.U.U.A. pp. 147-155.
138. Wieder, R. K., Tchobanoglous, G. y Tittle, R. W. 1989. *Capítulo 25: Preliminary considerations regarding constructed wetlands for wastewater treatment*. En: *Constructed wetlands for wastewater treatment Municipal, industrial and agricultural*. Editado por Donald A. Hammer. Lewis Publishers Inc. E.E.U.U.A. pp. 297-305
139. Wolverton, B. C. 1986. *Artificial Marshes for wastewater treatment*. En: *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. Editado por K. R. Reedy y W. H. Smith. Magnolia publishing Inc. Orlando Florida, E.E.U.U.A. pp.140-151
140. Wood, A. 1995. *Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding*. Wat. Sci. Tech. Vol. 32, No. 3. pp. 21-29
141. Zachritz, W. y Lundie, L. 1995. *Artificial wetlands as a low-cost alternative for complex organic wastewaters: Phase I and II. Final report*. SCERP Project number WQ93-10 & MIEP. New México State University. E.E.U.U.A. http://www.civil.utah.edu/scerp/projects/WQ93_10_MIEP.html

142. Zachritz, W. 1999. *Characterization of benzoate degradation by and microbial Ecology of artificial wetland filter (AWF) systems*. SCERP Project number W4. New México State University. E.E.U.U.A. <http://www.civil.utah.edu/scerp/projects/W4.html>
143. Zachritz, W. 1999a. *Preliminary characterization of chlorophenol degradation by artificial wetland filter (AWF) systems*. SCERP Project number W18. New México State University. E.E.U.U.A. <http://www.civil.utah.edu/scerp/projects/W18.html>

ANEXO 1: CUESTIONARIO- ENCUESTA.

INVENTARIO SOBRE HUMEDALES ARTIFICIALES EN MÉXICO

Instrucciones:

Marque con una X en el cuadro que corresponda, si alguna pregunta no aplica al tipo de humedal que usted construyó favor de especificarlo con las letras N.A.

1. El humedal artificial construido es una planta piloto.
- SI NO

En caso de ser negativa su respuesta especifique

2. Año en el que fue construido _____
3. Años de operación _____
4. Costo total de la construcción. _____
5. Costos de operación y mantenimiento anual _____
6. Condiciones climatológicas de la región _____

7. Evapotranspiración anual _____

8. El humedal construido se encuentra instalado como un sistema

- Primario
- Secundario
- Terciario

9. Tipo de tratamiento preliminar aplicado al agua residual antes de entrar al humedal _____

10. Tipo de humedal construido

- Sistema de plantas de libre flotación
- Sistema de plantas submergentes
- Sistema de plantas emergentes
- Otros especifique _____

11. Con respecto al tipo de flujo es

- Humedal artificial de flujo horizontal
- Humedal artificial de flujo vertical
- Humedal artificial de flujo libre superficial
- Otros especifique _____

12. Tipo de lecho de soporte utilizado

- Arena
- Grava
- Otros especifique _____

13. Conductividad hidráulica del material de soporte

Porosidad _____

Capacidad de absorción y adsorción _____

ANEXO 2: MACROFITAS EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Las plantas que crecen en los sistemas de humedales tanto artificiales como naturales son llamadas macrofitas. Este término incluye tanto a plantas acuáticas vasculares del tipo de las angiospermas, helechos y musgo acuático como algunas grandes algas de tejidos visibles. Aunque helechos como la *Salvinia* y *Azolla* y grandes algas como *Cladophora* se encuentran diseminadas en los humedales, en general las plantas con flores o angiospermas son las dominantes (Brix, 1997).

Las macrofitas empleadas en los sistemas de humedales artificiales poseen propiedades intrínsecas que las convierten en parte esencial del diseño de los mismos. Las funciones más importantes de las macrofitas en relación con el tratamiento de las aguas residuales, son las relacionadas con los efectos físicos provocados por el crecimiento de las plantas, como por ejemplo: el control de la erosión al estabilizar el fondo de los lechos, el generar condiciones para tener una buena filtración y servir para que los microorganismos se adhieran; mientras que los efectos relacionados con el metabolismo de las plantas, como son la toma de nutrimentos y la liberación de oxígeno hacia el medio, son más dependientes del diseño del sistema. Las macrofitas tienen un valor adicional al servir de hábitat para la vida salvaje como son aves, reptiles o insectos entre otros y, proporcionar al sistema de una apariencia estética (Brix, 1997). Estas características se resumen en la tabla 23.

TABLA 23. FUNCION DE LAS MACROFITAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

PROPIEDAD DE LA MACROFITA	FUNCIÓN EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO	EFECTO OBTENIDO
Tejido aéreo de las plantas	<ul style="list-style-type: none"> • Atenuación de la luz solar • Influencia en el microclima • Reducción de la velocidad del viento • Toma de nutrimentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del crecimiento del fitoplancton, especialmente en sistemas de plantas de libre flotación. • Aislamiento durante el invierno, previniendo la congelación de la superficie del agua y disminución de la temperatura en verano. • Reducción del riesgo de resuspensión de los sólidos sedimentados en el fondo del humedal y mejora la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación.

Modificado de Brix, 1997

CONTINUACIÓN.....

TABLA 23. FUNCIÓN DE LAS MACROFITAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

PROPIEDAD DE LA MACROFITA	FUNCIÓN EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO	EFEECTO OBTENIDO
Tejidos de las plantas en el agua	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración • Reducción de la velocidad del agua residual • Proveer de un área para que los microorganismos se adhieran • Secreción de oxígeno fotosintético • Toma de nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la velocidad de filtración, reducción del riesgo de resuspensión de los sedimentos del fondo del lecho e incremento del tiempo de contacto entre el agua y la superficie de las plantas • Densas comunidades de algas fotosintéticas, bacterias y protozoos colonizan el tejido • Incremento de la degradación aerobia • Los nutrientes son empleados por las plantas para su crecimiento y reproducción
Raíces y rizomas en el sedimento	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización de la superficie del sedimento • Puede ayudar a evitar el azolvamiento de los sistemas, principalmente en los de HAFV • Liberación de oxígeno • Toma de nutrientes • Secreción de carbono fotosintético • Secreción de antibióticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor erosión del fondo del humedal • El crecimiento de las raíces, así como el movimiento de las plantas por el viento abre espacios en el lecho • Incremento de la degradación aerobia de la materia orgánica y de la nitrificación por el aumento de bacterias nitrificantes • Este carbono actúa como fuente de energía para las bacterias desnitrificadoras, incrementando la remoción de nitratos en algunos tipos de humedales artificiales (Platzer, 1996) • Eliminación de microorganismos patógenos

Modificado de Brix, 1997

La importancia de las macrofitas, en el proceso de tratamiento de las aguas residuales en los humedales artificiales, es analizada cualitativamente por Brix (Vymazal et al, 1998), para cuatro tipos de sistemas como son: los humedales artificiales de flujo superficial, flujo subsuperficial en sus modalidades de HAFH y HAFV y los sistemas híbridos. Los resultados son presentados en la tabla 24.

TABLA 24. IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS MACROFITAS EN LOS HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL, HAFH, HAFV Y SISTEMAS HÍBRIDOS

FUNCION EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL	FLUJO SUPERFICIAL	HAFH	HAFV	SISTEMAS HÍBRIDOS
Estabilidad de la superficie del lecho	Muy importante	Muy importante	Importante	Importante
Prevención del azolvamiento	Sin importancia	Sin importancia	Muy importante	Muy importante
Reducción de la velocidad	Importante	Sin importancia	Sin importancia	Sin importancia
Atenuación de la luz	Muy importante	Poco importante	Muy poco importante	Importante
Aislamiento	Importante	Importante	Importante	Importante
Adhesión de microorganismos	Muy importante	Importante	Muy poco importante	Muy poco importante
Toma de nutrimentos	Muy importante	Muy poco importante	Sin importancia	Muy poco importante
Transferencia de oxígeno y secreción	Muy poco importante	Poco importante	Muy poco importante	Muy poco importante
Hábitat para la vida salvaje	Muy importante	Importante	Muy poco importante	Muy poco importante
Estética	Muy importante	Muy importante	Importante	Muy importante

Un punto importante en la selección de las macrofitas es la capacidad de remoción de contaminantes que poseen, es por ello que en la tabla 25, se presenta la cantidad en kilogramos tanto de nitrógeno como de fósforo que pueden tomar anualmente alguna de las plantas más empleadas (Wood, 1995).

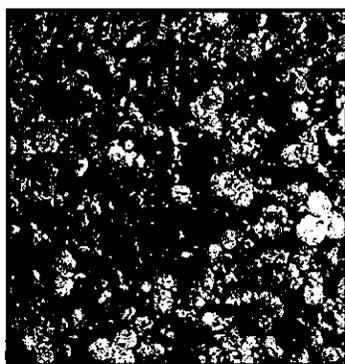
TABLA 25. CAPACIDAD DE TOMA DE NUTRIMENTOS DE ALGUNAS MACROFITAS EMPLEADAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

MACROFITA	NITRÓGENO (kg./ha año)	FÓSFORO (kg./ha año)
<i>Cyperus papyrus</i>	1220	80
<i>Phragmites comunis</i>	2313	162
<i>Typha latifolia</i>	1164	179

Fuente: Wood, 1995

En la siguiente serie de figuras se muestra una recopilación fotográfica de algunas de las macrofitas utilizadas en los humedales artificiales. En primer término, se presentan las macrofitas acuáticas de hojas flotantes y libre flotación y, en segundo término las macrofitas acuáticas emergentes.

MACROFITAS ACUÁTICAS DE HOJAS FLOTANTES Y LIBRE FLOTACIÓN



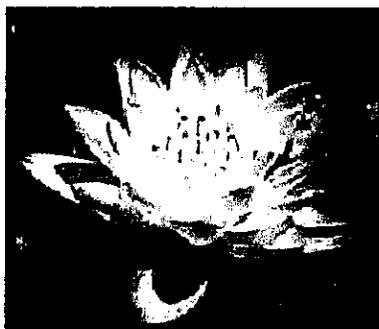
Lemna minor
(Fuente: USDA, 1999)



Eichhornia crassipes, Water hyacinth
(Fuente: Universidad de Florida, 1999)



Blueberry



NENUFAR (WATER LILY)



Pennywort



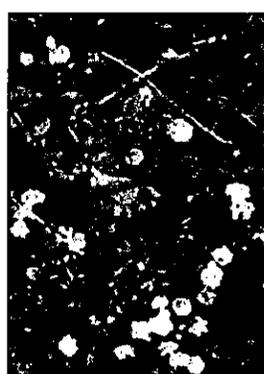
Blue Flag



Beauty Berry



Pickerel Weed



Creeping Jenny



Lizard Tail

FIGURA 27. ALGUNAS MACROFITAS DE HOJAS FLOTANTES Y DE LIBRE FLOTACIÓN EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL
(Fuente: Water recycling, 1998 y 1998a.)

MACROFITAS ACUÁTICAS EMERGENTES



FIGURA 28. CARRIZO, (*Phragmites australis*) LA FOTO DE LA DERECHA ES UN ACERCAMIENTO DE LA PLANTA. (Fuente: Universidad de Florida, 1999)

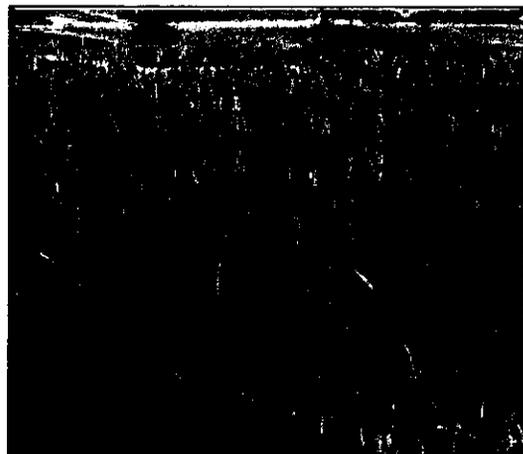


FIGURA 29 . TULE (*Thypha latifolia*) LA FOTO DE LA IZQUIERDA ES UN ACERCAMIENTO DE LA PLANTA (Fuente: Universidad de Florida, 1999)



FIGURA 30. JUNCOS. SE PRESENTAN DOS CLASES DE JUNCOS A LA IZQUIERDA *Scirpus validus* Y A LA DERECHA UN ACERCAMIENTO DE *Scirpus spp.* (Fuente. Universidad de Florida, 1999)