



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL A ESCALA PROTOTIPO
UBICADO EN EL VIVERO FORESTAL DE COYOACÁN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

SANDRA LETICIA GARCÍA ARREOLA

ASESORA: DRA. ING. MA. DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ



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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

Remoción de materia orgánica en un humedal artificial de
flujo horizontal escala prototipo ubicado en el Vivero
Forestal de Coyoacán.

que presenta la pasante: Sandra Leticia García Arreola
 con número de cuenta: 09913378-4 para obtener el título de :
Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 1 de Agosto de 2006

PRESIDENTE Dra Ing. Ma. del Carmen Durán Domínguez

VOCAL Dr. Ricardo Paramont Hernández García

SECRETARIO IQ. Margarita Alonso Espinosa

PRIMER SUPLENTE MC. Gilberto Atilano Amaya Ventura

SEGUNDO SUPLENTE MC. Graciela Martínez Cruz

AGRADECIMIENTOS

A Dios por iluminar mi camino en todo momento.

A mis padres por su amor y cariño, por su apoyo incondicional en cada proyecto en mi vida, por los consejos y la educación que me dieron que es la mejor herencia. Muchas gracias. Los adoro.

A Paco por su apoyo, comprensión y por hacer mi vida más amena todos los días. Espero que estés orgulloso de mí. Te quiero mucho.

A Diana por su enorme paciencia, apoyo y comprensión en todo momento de mi vida. En especial, gracias por ser la mejor amiga que pude encontrar. Te quiero mucho.

A mis amigos por la confianza y el apoyo que me brindaron a lo largo del camino. Gracias por estar a mi lado y por su amistad incondicional. Los quiero mucho.

A mi abuelito Luis por que donde quiera que esté espero que su sueño se haya hecho realidad junto con el mío.

A la profesora Margarita Alonso Espinosa por su confianza y por su apoyo para mi superación profesional.

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa por el apoyo y los valiosos comentarios recibidos durante la realización de este proyecto.

Al M. en I.A. Alejandro Guido Zárate por sus valiosos comentarios y el enorme apoyo e interés otorgado a este proyecto. Muchas gracias.

A la Dra. Suemi Rodríguez Romo por el valiosísimo apoyo prestado a este proyecto y a mi formación académica.

Al personal que labora en los laboratorios del PIQAYQA por todo el apoyo otorgado durante el desarrollo del proyecto de investigación y al personal de la FES-C por su invaluable apoyo académico-administrativo para mi titulación.

Al personal técnico del Vivero Forestal de Coyoacán, especialmente a la Biol. Lourdes Hernández y al personal técnico del Sistema de Aguas de la Ciudad de México del Gobierno del Distrito Federal por su invaluable apoyo en las tareas de mantenimiento y operación del sistema de humedales artificiales de la UNAM en el Vivero Forestal de Coyoacán.

ÍNDICE

		Página
Agradecimientos		ii
Glosario		iii
Resumen		vi
Abstract		vii
<i>Capítulo 1.</i>	<i>Introducción</i>	4
1.1.	Problemática	4
1.2.	Objetivo general	5
1.3.	Alcances	6
1.4.	Metas	6
<i>Capítulo 2.</i>	<i>Fundamentos teóricos</i>	7
2.1.	Contaminación del agua	7
2.2.	Generalidades sobre humedales artificiales	8
2.2.1.	Definición de humedal	9
2.2.2.	Definición de humedal artificial	9
2.3.	Clasificación de los HA	11
2.3.1.	Sistemas de plantas de libre flotación	12
2.3.2.	Sistemas de plantas subemergentes	13
2.3.3.	Sistemas de plantas emergentes	13
2.3.3.1.	Sistemas de flujo libre superficial	14
2.3.3.2.	Sistemas de flujo subsuperficial	14
2.3.3.2.1.	Humedales artificiales de flujo horizontal	15
2.3.3.2.2.	Humedales artificiales de flujo vertical	16
2.4.	Componentes principales de los humedales artificiales	17
2.4.1.	Geomembrana o capa impermeabilizante	19
2.4.2.	Material de empaque	19
2.4.3.	Microorganismos	19
2.4.4.	Vegetación emergente	22
2.5.	Funcionamiento	22
2.5.1.	Procesos físicos	24
2.5.2.	Procesos químicos	24
2.5.3.	Procesos biológicos	24
2.6.	Remoción de materia orgánica en los humedales artificiales	24
2.6.1.	Determinación del contenido de materia orgánica	28
2.6.1.1.	Demanda química de oxígeno	29
2.6.1.2.	Demanda bioquímica de oxígeno	30
2.7.	Factores que influyen en su funcionamiento	31
2.7.1.	Temperatura	31
2.7.2.	Valor de pH	32
2.7.3.	Oxígeno disuelto	32
2.7.4.	Tipo de material de empaque	33
2.7.5.	Estaciones del año	34
2.7.6.	Diseño	35
2.7.7.	Tipo de planta	36

<i>Capítulo 3.</i>	<i>Metodología experimental</i>	37
3.1.	Sistema en estudio	37
3.2.	Parámetros evaluados	40
3.2.1.	Valor de pH	40
3.2.2.	Temperatura	41
3.2.3.	Demanda química de oxígeno	41
3.2.4.	Demanda bioquímica de oxígeno	41
3.2.5.	Altura promedio de las plantas	41
<i>Capítulo 4.</i>	<i>Resultados, análisis y discusión</i>	42
4.1.	Resultados obtenidos para el HAFH	42
4.1.1.	Valores de pH en el HAFH	42
4.1.2.	Temperaturas en el HAFH	44
4.1.3.	Demanda química de oxígeno en el HAFH	45
4.1.4.	Demanda bioquímica de oxígeno en el HAFH	47
4.2.	Otros resultados importantes	48
4.2.1.	Altura promedio de las plantas en el HAFH	48
<i>Capítulo 5.</i>	<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	51
5.1.	Conclusiones	51
5.2.	Recomendaciones	52
<i>Anexos</i>		55
<i>A.1.</i>	<i>Técnicas empleadas</i>	56
A.1.1.	Determinación de pH	56
A.1.2.	Determinación de temperatura	57
A.1.3.	Determinación del contenido de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno, DQO	57
A.1.4.	Determinación del contenido de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅	58
A.1.5.	Determinación de oxígeno disuelto	60
A.1.6.	Preparación de la curva de calibración para la demanda química de oxígeno, DQO.	64
A.1.7.	Curva de calibración utilizada durante el periodo experimental	65
A.1.8.	Datos experimentales obtenidos para el HAFH	66
A.1.8.1.	Valor de pH	66
A.1.8.2.	Temperatura (°C)	67
A.1.8.3.	Demanda química de oxígeno, DQO (mg O ₂ /L)	68
A.1.9.	Tratamiento de residuos generados por la técnica analítica para la demanda química de oxígeno	69
<i>A.2.</i>	<i>Acervo fotográfico</i>	72
<i>Bibliografía</i>		76

Índice de figuras, tablas y fotografías

Figura 2.1.	Principales mecanismos de remoción en los humedales artificiales (Lara-Borrero, 2006).	10
Figura 2.2.	Plantas acuáticas comunes (Metcalf y Eddy, 1991).	11
Figura 2.3.	Diferencias entre los humedales de flujo superficial y subsuperficial (Lara-Borrero, 2006)	14

Figura 2.4.	Corte longitudinal de un HAFH (Lara-Borrero, 2006)	15
Figura 2.5.	Arreglo típico de un HAFV (IWA, 2000)	16
Figura 2.6.	Componentes principales de un humedal (IWA, 2000)	18
Figura 2.7.	Etapas en la maduración del material de empaque de un humedal artificial: (a) recién plantado, (b) maduro (Kadlec y Knight, 1996)	20
Figura 2.8.	Transformaciones que sufre el carbono en el material de empaque y la columna de agua de los humedales. (Reddy y D'Angelo, 1997)	27
Figura 2.9.	Perfil de las rutas para la descomposición de la materia orgánica en el material de empaque de los HA (Kadlec y Knight, 1996).	29
Figura 2.10.	Transporte de gases dentro de las macrofitas (Brix, 1993).	33
Figura 3.1.	Diagrama de las dimensiones del HAFH (Durán-de-Bazúa y col., 2003)	37
Figura 3.2.	Esquema de flujo del río Magdalena desde su nacimiento (Durán-de-Bazúa y col, 2000).	38
Figura 3.3.	Figura 3.2. Representación esquemática de los equipos instalados en el HAFH (Durán-de-Bazúa, 2003).	40
Figura 4.1.	Comportamiento del pH en el HAFH	43
Figura 4.2.	Comportamiento de la temperatura en el HAFH	44
Figura 4.3.	Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el HAFH	45
Tabla 2.1.	Funciones principales de las macrofitas en los HA	23
Tabla 2.2.	Pasos a seguir para el diseño de un humedal artificial	35
Tabla 3.1.	Condiciones de operación del HAFH	39
Tabla 4.1.	Resultados de la DBO ₅ en el HAFH	48
Tabla 4.2.	Altura promedio de las plantas en el HAFH	49
Tabla A.1.6.1	Cantidades de solución estándar madre y agua destilada utilizadas para la elaboración de la curva de calibración	64
Fotografía 1.	Entrada al humedal artificial prototipo del PIQAYQA-FQ-UNAM ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán	72
Fotografía 2.	Estado inicial del humedal artificial prototipo	72
Fotografía 3.	Estado del río Magdalena al inicio de la experimentación	73
Fotografía 4.	Estado del humedal prototipo al final de la investigación	73
Fotografía 5.	Otra vista del estado del humedal prototipo al final de la investigación	74
Fotografía 6.	Salida del agua tratada de la cisterna a los canales de riego del Vivero Forestal de Coyoacán	74
Fotografía 7.	Instalación de un "dique" de costales para ayudar a subir el nivel del río Magdalena al final de la investigación	75
Fotografía 8.	Otra vista del "dique" de costales para ayudar a subir el nivel del río Magdalena al final de la investigación	75

GLOSARIO

Aerénquima: Viene de *parénquima*, del gr. cient. παρέγχυμα, sustancia de los órganos. Tejido vegetal constituido por células de forma aproximadamente esférica o cúbica y con espacios de separación y que sirve para “absorber” el CO₂ del aire y transformarlo en biomasa celular y oxígeno molecular (*aeros*, aire y *enchyma*, infusión).

Anóxico: Ambiente carente de oxígeno.

Azolvamientos: Acción y efecto de azolvar. Cegar o tupir con alguna cosa un conducto.

Bentonita: Arcilla de gran poder de absorción con múltiples usos industriales.

Biota: f. *Biol.* Conjunto de la fauna y la flora de una región.

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

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

Demanda bioquímica de oxígeno: Indicador del contenido de contaminantes de un efluente expresado por el consumo de oxígeno disuelto por parte de microorganismos que descomponen esos contaminantes, generalmente materia orgánica presente en el propio efluente. Se parte para ello, de la capacidad autodepurativa del agua, conferida por los propios microorganismos.

Se mide como la masa (en miligramos) de oxígeno utilizada para degradar los contaminantes contenidos en un litro de muestra de agua incubada a 20°C durante un periodo de cinco días (DBO₅).

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

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

Fotosíntesis: f. Proceso metabólico específico de ciertas células de los organismos autótrofos, por el que se sintetizan sustancias orgánicas a partir de otras inorgánicas, utilizando la energía luminosa.

HAFL: Humedal artificial de flujo libre.

HAFSS: Humedal artificial de flujo sub-superficial-

Hojarasca: Conjunto de hojas secas de las plantas.

Humedal: Son ecosistemas en la frontera entre agua y tierra. Independientemente de su vegetación, cada humedal se encuentra sobre un material impermeable en el que y sobre el cual se tienen condiciones de saturación de agua, al menos parte del año. Los humedales se encuentran en todos los tipos de regiones de vegetación natural, aunque la mayor parte de ellos son demasiado pequeños para estar representados en los mapas a pequeña escala.

Influente: Entrada de fluido a un sistema hecho por el hombre (del latín *fluere*, fluir y el prefijo *in*, hacia dentro).

Macrófitas: Plantas que crecen en o cerca del agua y que pueden ser emergentes, sub-emergentes o flotantes.

Metabolismo: Conjunto de transformaciones que experimentan las sustancias absorbidas por un organismo vivo: reacciones de síntesis, llamadas anabólicas, y reacciones de degradación que liberan energía, catabólicas.

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

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

Rizosfera: Zona del suelo muy próxima a la raíz en la que existe una amplia gama de sustancias que son exudadas al suelo circundante y que favorecen la actividad microbiana.

RESUMEN

Los humedales artificiales representan una alternativa viable como sistemas en la depuración de aguas residuales del tipo domésticas y, con el debido tiempo de adaptación, también para aguas residuales industriales. En México las investigaciones sobre este tipo de sistemas para el tratamiento de aguas residuales son escasas y es por eso que es de vital importancia continuar trabajando para de esta manera contribuir al mejoramiento de este tipo de tecnologías que además de mejorar la calidad del agua cuenta con muchas ventajas adicionales tanto económicas, como de mantenimiento y operación. La presente investigación se enfoca a la evaluación de la remoción de la materia orgánica presente en un río de la Ciudad de México contaminado con aguas residuales domésticas y de giros comerciales utilizando un sistema de humedales artificiales ubicado al sur del Distrito Federal. El sistema en estudio es un humedal artificial de flujo horizontal que cuenta con 75 m² de área superficial, ubicado dentro del Vivero Forestal de Coyoacán y alimentado con aguas residuales de tipo mixto del Río Magdalena. La evaluación de dicho sistema se llevó a cabo durante dos meses en los cuales estuvo trabajando en forma continua. Durante este periodo de tiempo se utilizó un tiempo de residencia hidráulico de 2.4 días el cual se logró alimentando al sistema un flujo de 10.39 m³/día. Se compararon los resultados obtenidos en estos dos meses de operación con los obtenidos en etapas anteriores de operación en los que los tiempos de residencia fueron 2.7 y 5.3 días. Esto permitirá evaluar cuáles pueden ser las condiciones óptimas de operación en futuras experimentaciones. De forma adicional, se evaluó la productividad de biomasa obtenida del crecimiento de las plantas en esta etapa para que en otras investigaciones se vea su posible uso como material abultante de sistemas de composta con los lodos primarios. Los resultados obtenidos indican que la eficiencia de depuración fue menor que con los dos tiempos de residencia estudiados anteriormente, probablemente debido a las intensas lluvias que impiden controlar el flujo de agua al humedal artificial, lo que implica que el óptimo se alcanzará con otras condiciones diferentes a las actuales.

Palabras clave: Humedales artificiales, tiempo de residencia hidráulica

ABSTRACT

Constructed or artificial wetlands, CW, AW, represent a feasible treatment technology for sewage as well as for industrial waste waters, if adaptation to them is allowed. Research in México on these wastewater treatment systems is relatively scarce, and therefore, it is necessary to continue the investigation in this field in order to improve the understanding of these systems. CW are technologically feasible and also quite competitive from the economic point of view (especially during operation and maintenance tasks). The ongoing research is focused on the study of organic matter removal using an existing constructed wetland waste water treatment system located in the southern part of Mexico City. The studied system works under a horizontal flow pattern, with a surface area of 75 m² located in a plant Vivarium (Viveros de Coyoacán) and it is fed with mixed waste waters from a polluted river (Río Magdalena). Performance of such a system was done during a two-month period by continuous sampling. In order to evaluate the performance of the CW and compare it with previous hydraulic residence times (HRT), a HRT of 2.4d was used (with an inflow of 10.39m³/d). A comparison of pollutants removal efficiency was done between previous HRT (2.7 y 5.3d) and the results obtained in this period in order to look for an optimum in future experimentation. Additionally, macrophytes growth was evaluated since other experiments are using this biomass material as bulking support for composting experiments to stabilize primary sludge. Results obtained did not showed any correlation with the previous ones probably due to the seasonal variations in the wastewater (unusual copious rainy period) that impaired the inflow conditions, and most probably an optimum will be reached with other operating conditions.

Key Words: Constructed wetlands, hydraulic residence time

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA

En los últimos años, el problema de la contaminación de los cuerpos de agua ha creado una situación ambiental preocupante debido al manejo inadecuado de las descargas industriales y urbanas a los cuerpos de agua.

En la Ciudad de México, la problemática del agua se deriva del excesivo crecimiento poblacional, la mala planeación de las zonas habitacionales, la sobreexplotación de las aguas subterráneas así como la contaminación de las aguas superficiales y su desperdicio. Además de estos problemas, la gran cantidad de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas sin tratamiento previo que se descargan a los cauces de los ríos utilizados a su vez como drenaje ha creado una situación alarmante, ya que cada día que pasa se van contaminando las pocas fuentes de abasto con las que cuenta la ciudad.

Debido a esta situación se han buscado alternativas viables para el saneamiento de dichas aguas. De acuerdo con la SEMARNAT (2006), de la cantidad generada de aguas residuales municipales menos del 20% recibe algún tipo de tratamiento. Además de los sistemas de tratamiento convencionales, en los últimos años, los sistemas “naturales” o basados en el uso de tecnologías ecológicas o tecnologías “verdes” de tratamiento han tenido una fuerte aceptación ya que estos aprovechan los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la naturaleza para mejorar la calidad del agua. Muchos de los mecanismos de remoción que emplean estos sistemas incluyen los utilizados en las plantas de tratamiento convencionales.

Un ejemplo de este tipo de tecnologías son los humedales artificiales (HA) o humedales construidos. Los HA son sistemas de tratamiento de aguas residuales donde a través de procesos físicos (filtración y sedimentación), químicos (precipitación y óxido-reducción) y biológicos (bioasimilación), se eliminan contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en las aguas

residuales. Por otro lado, este tipo de tecnología es una opción sencilla atendiendo a su construcción, operación y mantenimiento, además de eficiente en el nivel de remoción de contaminantes. En México este tipo de sistemas han tenido poco desarrollo y la mayoría de los sistemas instalados aun son escala laboratorio o planta piloto. A nivel mundial se han empleado por más de dos décadas en instalaciones reales, tanto para tratamiento de aguas residuales o para su pulimento (Durán-de-Bazúa y col., 2006).

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

- Eliminan físicamente los contaminantes en la superficie del material de empaque del HA y la materia orgánica mediante procesos de filtración y sedimentación.
- Utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos (principalmente bacterias y hongos).
- Logran niveles de tratamiento eficientes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento.

Atendiendo al régimen hidráulico, existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual: sistemas a flujo libre (HAFL) y sistemas de flujo subsuperficial (HAFSS). Estos últimos son los más usados ya que no proliferan mosquitos ni ninguna otra plaga dañina (Rodríguez y Varela, 2003).

1.2. OBJETIVO GENERAL

Con base en estos conceptos y la problemática planteada, el objetivo de esta investigación es:

- Estudiar la remoción de la materia orgánica en un humedal artificial de flujo subsuperficial de tipo horizontal a escala prototipo, empacado con tezontle, plantado con carrizos y papiros para observar el estado actual que guarda el sistema experimental en estudio.

1.3. ALCANCES

- Estudiar la remoción de la materia orgánica en el humedal artificial durante dos meses de experimentación, medida como demanda química de oxígeno.
- Evaluar la remoción de los contaminantes con el crecimiento de las plantas.
- Verificar el estado actual del sistema experimental en términos de la eficiencia de remoción de la materia orgánica, con respecto a los resultados obtenidos al momento de la instalación del sistema hace más de diez años.

1.4. METAS

- Utilizar un tiempo de residencia hidráulico en el sistema experimental diferente a los usados en investigaciones anteriores para evaluar su funcionamiento.
- Comparar la remoción de la materia orgánica en el sistema experimental a través de las mediciones de demanda química de oxígeno.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El agua pura es un recurso renovable de primera necesidad, ya que es esencial para el desarrollo y la conservación de la vida. No obstante, debido al mal uso del que ha sido objeto, se habla de una deficiencia en la calidad de la misma, además de considerarla como foco de enfermedades infecciosas que afecta a la sociedad.

Se considera que el agua está contaminada cuando se introducen de forma directa o indirecta materias o formas de energía que implican una alteración de sus condiciones originales, es decir, cuando se ven afectadas sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Anónimo, 2006).

Dentro de los principales contaminantes del agua se encuentran (Durán-de-Bazúa, 1994):

- Compuestos orgánicos biodegradables
- Compuestos químicos inorgánicos
- Metales
- Agentes tensoactivos
- Sólidos sedimentables
- Sustancias radiactivas
- Nutrientes en exceso (N y P)
- Organismos patógenos
- Calor y otras formas de energía
- Compuestos persistentes

En las últimas tres décadas, los esfuerzos para mejorar la calidad del agua utilizando sistemas naturales se han incrementado considerablemente, ya que estos son capaces de remover en cantidades importantes a la mayoría de las sustancias contaminantes.

Los sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales son diseñados para simular los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la naturaleza, al interactuar el agua, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera (Metcalf y Eddy, 1991).

Estos procesos se pueden clasificar como sigue:

- 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 las plantas.

Dentro de los sistemas naturales, sobresalen los sistemas de humedales artificiales, ya que estos son capaces de llevar a cabo un tratamiento integral.

Además, está acompañado de grandes ventajas tanto económicas como técnicas en comparación con los sistemas tradicionales (aerobios y anaerobios, como lodos activados, lagunas de oxidación, reactores empacados, reactores de biodiscos, reactores anaerobios de lecho de lodos, reactores secuenciados, etc.).

2.2 GENERALIDADES SOBRE HUMEDALES ARTIFICIALES

Como ya se mencionó anteriormente, los sistemas de humedales artificiales han cobrado gran importancia dentro del tratamiento de aguas residuales, no sólo a nivel nacional sino a nivel mundial.

En México, es conocido que los antiguos aztecas utilizaban sistemas basados en filtros de arena y plantas silvestres para descargar sus aguas residuales y de esta manera evitar que se contaminaran los lagos que circundaban a la ciudad de México-Tenochtitlan (Durán-de-Bazúa y col., 2006).

En la actualidad este tipo de tecnología ha sido aplicada en diferentes países a lo largo de los cinco continentes para tratar diferentes tipos de aguas residuales no sólo domésticas, los HA también se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales industriales.

2.2.1 Definición de humedal

Los humedales son áreas que se encuentran inundadas de manera temporal o permanente, de forma que se conserven las condiciones saturadas del suelo. Son zonas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos. Los humedales se caracterizan por la presencia de vegetación que se adapta a diferentes niveles de inundación del suelo. Estos sistemas tienen comúnmente una profundidad del agua menor a 0.6 m (Metcalf y Eddy, 1991).

Dentro de los sistemas de humedales podemos encontrar dos tipos principales: naturales y artificiales. Ambos tipos se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales, aunque los humedales naturales únicamente realizan esta función después de un tratamiento substancial; dichos humedales generalmente se utilizan para tratar de mejorar el hábitat existente.

2.2.2. Definición de humedal artificial, HA

Un humedal artificial es una ecotecnología de tratamiento de aguas residuales, la cual basa sus principios de operación en la actividad bioquímica de los microorganismos y de vegetales, distribuidos en un lecho a base de material inerte como la gravilla y arena (Durán-de-Bazúa y col., 2003).

La construcción de humedales artificiales para mejorar el hábitat y la calidad del agua comenzó con el movimiento en pro del ambiente en la década de los setenta con los trabajos pioneros de la Dra. Seidel en el Instituto Max Planck, Alemania (Guido-Zárate, 2006a).

Dentro de los humedales artificiales se llevan a cabo diversos procesos que ayudan a la remoción de los contaminantes presentes en el agua, muchos de ellos también son utilizados en sistemas convencionales de tratamiento. En la **Figura 2.1** se pueden ver los principales procesos de remoción que se llevan a cabo en un humedal artificial y que permiten la depuración del agua residual.

Un humedal artificial depende en gran medida de sus poblaciones microbianas y su vegetación, en forma estructural y funcional.

Las comunidades bacterianas que incluyen bacterias, hongos y algas son de gran importancia debido a su participación en los ciclos que llevan a cabo los nutrientes (N, P y C) y las transformaciones que sufren los contaminantes. Además, debido a la gran variedad de bacterias presentes en

estos sistemas y a las condiciones físicas y químicas que soportan es que se pueden obtener los resultados deseados en el tratamiento de aguas residuales.

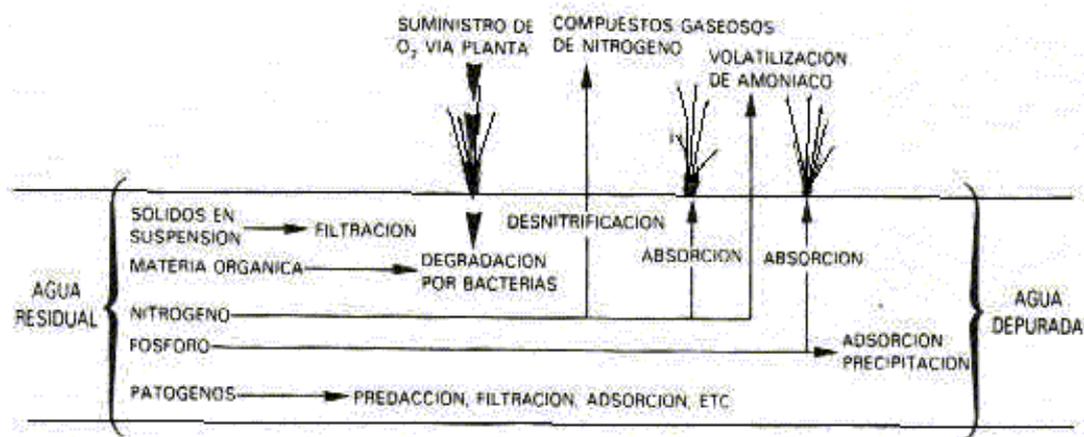


Figura 2.1. Principales mecanismos de remoción en los humedales artificiales

Fuente: (Lara-Borrero, 2006)

La vegetación presente en estos sistemas es de gran importancia ya que al realizar algunos de los procesos más básicos para su supervivencia va a ayudar a mejorar la calidad del agua, ya que proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Lara-Borrero, 2006).

Es necesario tener un conocimiento básico de los requerimientos para el adecuado crecimiento y las características de dichas plantas para tener un sistema de tratamiento correctamente diseñado y que funcione exitosamente.

Existen diferentes especies de plantas que pueden adaptarse a este tipo de sistemas dependiendo de la calidad del agua que se desea obtener, profundidad del agua, clima y latitud de instalación; así como requerimientos de mantenimiento y las metas del proyecto (Kadlec y Knight, 1996).

Una amplia variedad de plantas conocidas como macrofitas crecen naturalmente en los HA, las macrofitas incluyen plantas vasculares que cuentan con tejidos que son fácilmente visibles (i.e. carrizos, espadañas, juncos, lirios, etc).

En la **Figura 2.2** se muestran algunas de las especies que se encuentran comúnmente en los humedales:

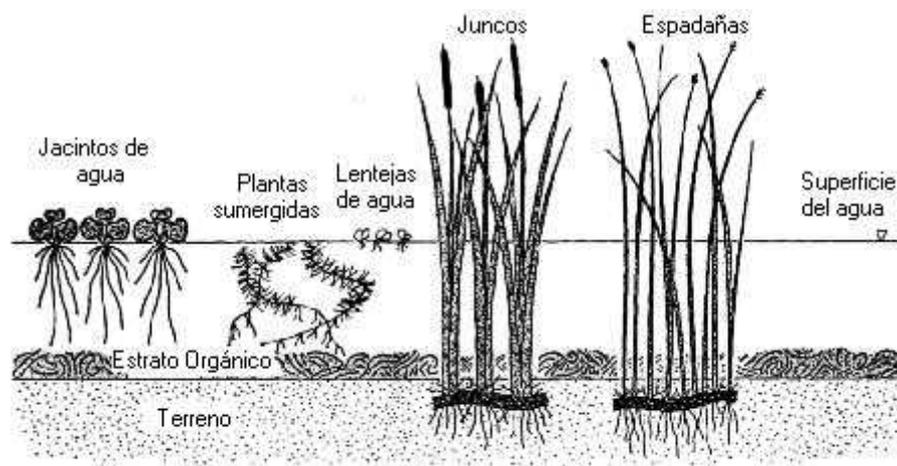


Figura 2.2. Plantas acuáticas comunes

Fuente:(Metcalf y Eddy , 1991).

Los humedales artificiales (HA) pueden ser construidos en casi cualquier lugar y generalmente se construyen debido a uno o más de los siguientes motivos: creación de un hábitat, mejoramiento de la calidad del agua, control de inundaciones y para acuacultura.

En esta investigación se tomará como eje central la construcción de este tipo de sistemas para mejorar la calidad del agua residual y su reutilización.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES, HA

Existen diferentes tipos fundamentales de plantas de tratamiento empleando humedales artificiales. Según describen varios autores, se establece la siguiente clasificación, en relación con la forma de vida de las plantas o macrofitas y el flujo del agua (Durán-de-Bazúa y col., 2000):

I. Plantas o macrofitas

1. Sistemas de plantas de libre flotación

-Lirio acuático (*Iris sibirica*), chichicastle o lentejuela o lenteja de agua (*Lemma minor*), ombligo de Venus (*Umbilicus pendulinus*), etc.

-Maleza acuática

2. Sistemas de plantas subemergentes

3. Sistemas de plantas emergentes (juncos, espadañas, carrizos, etc.)

II. Forma de flujo del agua

- de flujo libre superficial

- de flujo subsuperficial (flujo vertical y flujo horizontal)

A continuación se explican en forma breve los principios de operación de cada uno de estos sistemas:

2.3.1 Sistemas de plantas de libre flotación

Los sistemas de plantas de libre flotación son muy variados en cuanto a su forma y hábitat.

En este tipo de sistemas, las plantas, al encontrarse en la superficie del agua utilizan el dióxido de carbono atmosférico para la fotosíntesis, generando oxígeno y toman los nutrientes del agua por medio de sus raíces, las cuales son un excelente medio para la absorción/filtración de sólidos suspendidos y el crecimiento de bacterias (IWA, 2000).

Al utilizar este tipo de sistema, la penetración de la luz solar dentro del agua se reduce y la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua se ve restringida debido a la alta densidad de plantas.

Una observación de interés en estos sistemas, es que el oxígeno que se produce durante la fotosíntesis se puede trasladar a la zona de la raíz haciendo posible que los microorganismos lleven a cabo la degradación de forma aerobia en la cercanía de sus raíces a pesar de que el agua circundante forme una zona anaerobia/anóxica (IWA, 2000).

Los sistemas de plantas flotantes son muy efectivos en la remoción de fósforo, nitrógeno y metales pesados.

Estos sistemas se diseñan principalmente para zonas tropicales y subtropicales, ya que las bajas temperaturas afectan severamente su funcionamiento. De manera adicional, cuenta con limitantes de espacio y si no es operado adecuadamente puede presentar olores desagradables y presencia de mosquitos (Brix, 1993a).

2.3.2 Sistemas de plantas subemergentes

Las plantas de los sistemas de plantas subemergentes tienen sus tejidos sumergidos completamente en el agua.

Las macrofitas acuáticas subemergentes efectúan la fotosíntesis agotando el carbono inorgánico disuelto en el agua e incrementando el contenido de oxígeno disuelto durante los periodos de alta actividad fotosintética, esto resulta en un incremento de pH creando condiciones óptimas para la volatilización del amoníaco y la precipitación química del fósforo.

Concentraciones altas de oxígeno crean condiciones favorables para la mineralización de la materia orgánica en el agua y como este tipo de plantas acuáticas tienen la habilidad de asimilar los nutrientes del agua contaminada, crecen bastante bien y durante el día mantienen el agua oxigenada (Rodríguez y Varela, 2003).

Es por esto, que los sistemas de plantas subemergentes no pueden ser utilizados para tratar aguas residuales con alto contenido de carga orgánica o rápidamente biodegradables ya que al ocurrir la biodegradación se crean condiciones anóxicas. De forma adicional, se debe cuidar que la turbiedad del agua no sea muy alta para asegurar que la luz solar llegue a las plantas.

El principal uso de estos sistemas es el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.

2.3.3 Sistemas de plantas emergentes

Estos sistemas se componen básicamente de canales impermeabilizados y rellenos de escoria volcánica, gravilla, arcilla o algún material de soporte en el cual se siembran las plantas. Dichas plantas son principalmente: carrizo (*Phragmites australis*), espadaña o "tule" (*Typha latifolia*) y juncos (*Juncus sp.*).

Respecto del flujo del agua se cuenta con dos subdivisiones: Sistemas de flujo libre superficial y sistemas de flujo subsuperficial, atendiendo a la forma en que se alimenta el agua residual. Ambos sistemas se muestran en la **Figura 2.3.**

2.3.4 Sistemas de flujo libre superficial

En los sistemas de flujo libre superficial las plantas se encuentran fijas al lecho de soporte a través de las raíces y rizomas.

El agua fluye sobre el lecho a baja velocidad cubriendo todo el humedal, de esta manera el agua entra en contacto con las hojas y los tallos aumentando la oxigenación del medio y la mineralización de los compuestos orgánicos, debido a la presencia de microorganismos aerobios.

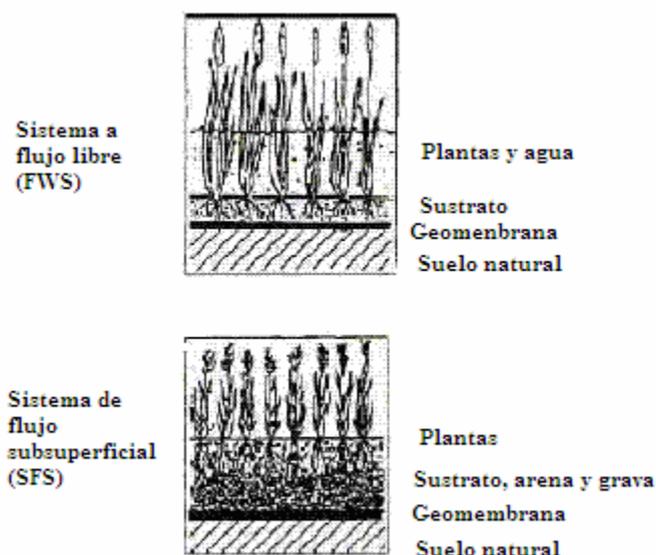


Figura 2.3. Diferencias entre los humedales de flujo superficial y subsuperficial

Fuente: (Lara-Borrero, 2006)

En estos sistemas la zona superficial del agua es aerobia y conforme aumenta su profundidad el sustrato se va haciendo anaerobio (IWA, 2000).

El agua que se alimenta a este tipo de sistemas tiene que recibir un tratamiento previo y alimentarse de forma continua.

2.3.5 Sistemas de flujo subsuperficial

En los sistemas de flujo subsuperficial el agua fluye por la zona de la raíz (rizosfera) y a través del lecho en el cual las raíces están totalmente inmersas. Este tipo de sistemas se utiliza con flujos de agua bajos y se les puede alimentar agua que únicamente tiene un tratamiento primario previo.

El tratamiento del agua es más eficiente que en los otros sistemas mencionados anteriormente, ya que los microorganismos encuentran mayor área de soporte en los poros, retículos y superficies que se forman en el lecho, reteniendo a la materia orgánica atrapada para que reaccione con el sustrato.

Dependiendo del patrón de flujo este tipo de sistemas se dividen en:

- Humedales artificiales de flujo horizontal
- Humedales artificiales de flujo vertical

2.3.5.1 Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)

En estos sistemas el influente se alimenta en forma continua por uno de los extremos del humedal, que está conformado por plantas vasculares, microorganismos y un lecho o medio filtrante. El HAFH debe tener una pendiente de 1%. Como se muestra en la **Figura 2.4**, el sistema de alimentación es, normalmente, un tubo horizontal perforado o una canaleta, que está montado de tal manera que facilite la infiltración por gravedad al lecho del agua residual a tratar, buscando que no se formen caminos preferenciales que reduzcan el área real de transferencia de masa y, por ende, la transformación de los contaminantes orgánicos en compuestos más estables como el CO₂, agua, nitritos y sulfatos (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998).

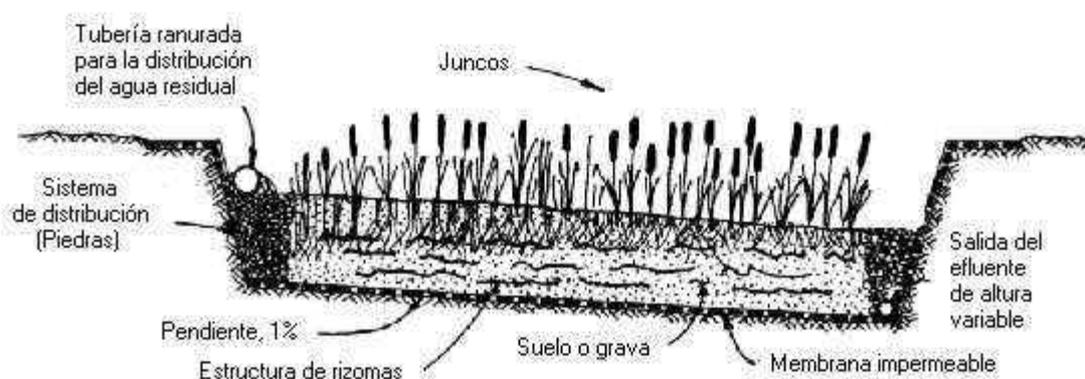


Figura 2.4. Corte longitudinal de un HAFH

Fuente: (Lara-Borrero, 2006)

En estos sistemas, el agua residual se alimenta al humedal y fluye lentamente a través del medio poroso bajo la superficie del lecho en un patrón de flujo horizontal hacia la zona de salida, donde se recolecta. Durante su trayectoria, el agua entra en contacto con una serie de zonas aerobias, anaerobias y anóxicas. Las zonas aerobias se presentan alrededor de la raíz y los rizomas. Al pasar a través de la rizosfera el agua es limpiada por degradación biológica y procesos físicos y químicos (IWA, 2000).

2.3.5.2 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

Este tipo de humedales se utilizan típicamente como sistemas de tratamiento secundario.

En estos sistemas es necesario contar con un medio de soporte compuesto por partículas de diferente granulometría.

En los HAFV, como el que se muestra en la **Figura 2.5**, el agua se alimenta a lo largo del lecho en forma discontinua, inundando la superficie y fluyendo de forma vertical a través del medio de soporte; durante el período de carga el aire es forzado a salir del medio de soporte y durante el período de secado el aire atmosférico es arrastrado hacia los espacios entre los poros del sustrato, incrementando con esto la oxigenación del lecho (Rodríguez y Varela, 2003).

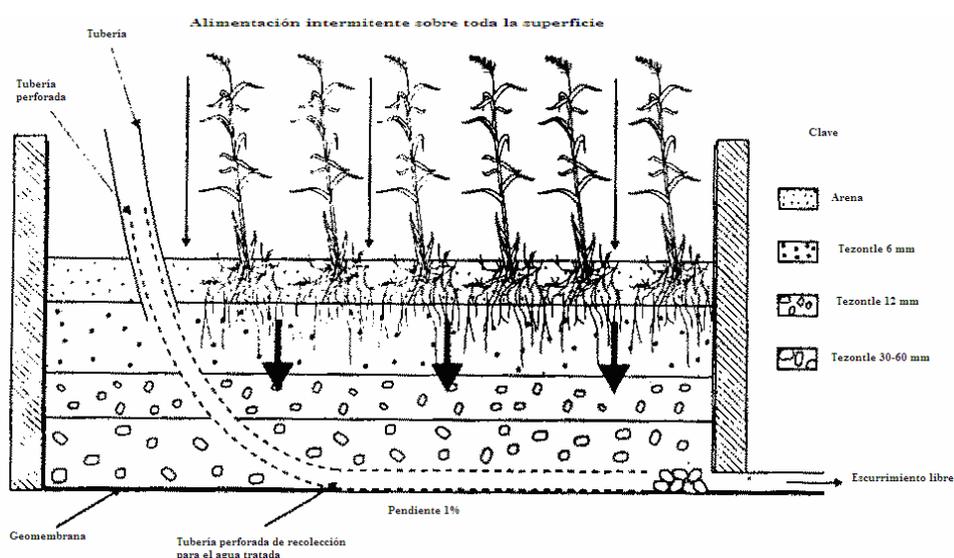


Figura 2.5. Arreglo típico de un HAFV

Fuente: (IWA, 2000)

La eficiencia del proceso de depuración de estos sistemas depende del grado de aireación del medio de soporte.

El inconveniente de este tipo de sistemas es que requieren un montaje relativamente complejo para la distribución del sistema de irrigación y mayor mantenimiento para evitar azolvamientos (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998).

2.4. COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS HA

Los sistemas de HA están formados por diferentes componentes estructurales, dentro de los principales se encuentran:

- **Geomembrana o capa impermeabilizante:** consiste en una capa compuesta con material orgánico, mineral o sintético el cual tiene la función de impermeabilizar el terreno y se encuentra bajo la zona activa de la raíz de las plantas en el humedal y evitar que el agua residual contamine el subsuelo.
- **Microorganismos:** los microorganismos presentes en un HA son quizá el componente de mayor importancia en términos de la remoción de materia orgánica dentro de un HA. Dichos microorganismos comprenden principalmente a las bacterias, aunque se pueden encontrar hongos, protozoarios, virus y algas.
- **Material de empaque:** Éste sirve como su nombre lo indica, como empaque del sistema, además de servir de soporte para las plantas y microorganismos. El material de empaque se caracteriza por que aunque permanece mucho tiempo inundado o saturado con agua, desarrolla condiciones anaerobias que favorecen el crecimiento y la regeneración de la vegetación. Además de servir de soporte, el material de empaque tiene la función de filtrar los sólidos presentes en los efluentes residuales.
- **Detritus:** es el conjunto de materia orgánica viva o muerta que se acumula en el humedal, esta consiste en plantas muertas, animales vivos o muertos (principalmente invertebrados) y microbios.

- Columna de agua: Es la porción del humedal que permanece inundado de manera temporal y que crea un hábitat para diferentes organismos acuáticos y para algunas plantas subemergentes y flotantes que dependen del nivel y soporte del agua, así como a poblaciones microbianas.
- Vegetación emergente: Son plantas fijas al suelo por medio de raíces que contienen elementos estructurales que se encuentran sobre la superficie del agua.

Los humedales artificiales pueden diferir un poco en la madurez de sus componentes estructurales, pero esencialmente cuenta con los mismos elementos que un humedal natural, estos se muestran en la **Figura 2.6**.

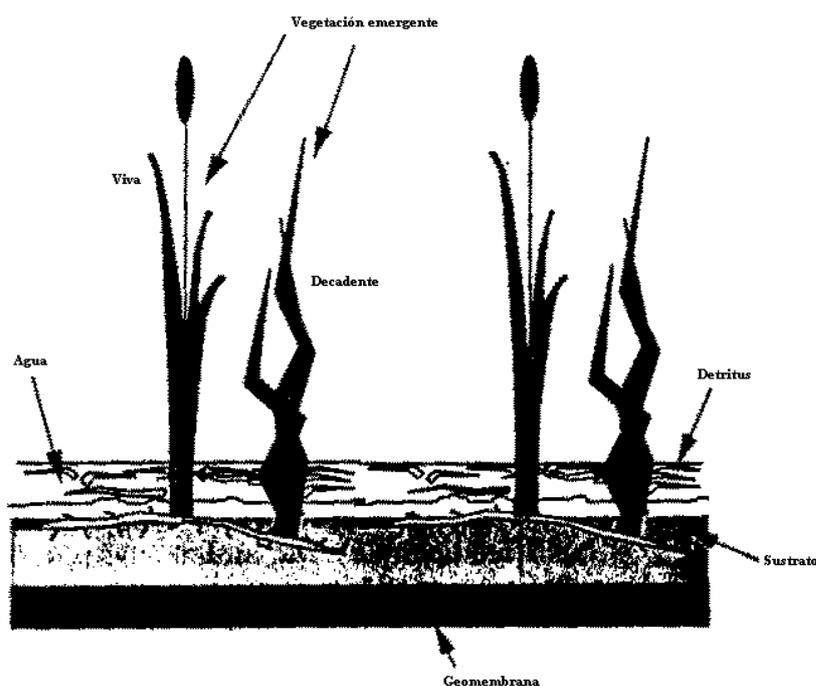


Figura 2.6. Componentes principales de un humedal

Fuente: (IWA, 2000)

Las condiciones hidrológicas tienen influencia en el comportamiento del sistema y a su vez determina las características de la biota en el sistema. Además el flujo de agua y la capacidad de almacenamiento van a determinar el tiempo de residencia del agua en el humedal, dando oportunidad para que las

sustancias presentes en el agua interactúen con la biota presente en el humedal.

2.4.1. Geomembrana o capa impermeabilizante

Es importante colocar esta capa impermeabilizante en todos los HA debido a que ésta impide que el agua residual contamine el agua subterránea.

En ocasiones esta geomembrana está constituida en forma natural por una capa de arcilla o los materiales que se encuentran in-situ y que pueden ser compactados hasta un estado cercano al impermeable. Otras posibilidades son los tratamientos químicos, una capa de bentonita, asfalto o algún tipo de membrana (Lara-Borrero, 2006).

2.4.2. Material de empaque

El material de empaque es el elemento principal para el almacenamiento de los elementos bióticos y abióticos en un humedal.

En los humedales se llevan a cabo diferentes transformaciones químicas debidas al rango de estados de oxidación que se presentan generalmente en dichos materiales. Las reacciones de óxido-reducción o “redox” son las que modifican las especies en que se encuentran los diferentes compuestos en las aguas residuales.

El factor principal que tiene influencia en la naturaleza química de los materiales de empaque es la concentración de oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto disminuye a medida que aumenta la profundidad del mismo, debido al metabolismo de los microorganismos aerobios y a la oxidación química de las sustancias reducidas. Esta disminución es medida como un potencial eléctrico cada vez más negativo, conocida como potencial redox, (E_h) (IWA, 2000).

Los materiales de empaque de los humedales artificiales sufren una serie de transformaciones debido a la acumulación de materia orgánica y metales durante su proceso de maduración, como se puede observar en la **Figura 2.7**.

2.4.3. Microorganismos

Los HA son ambientes que favorecen el crecimiento y reproducción de microorganismos, principalmente bacterias y hongos.

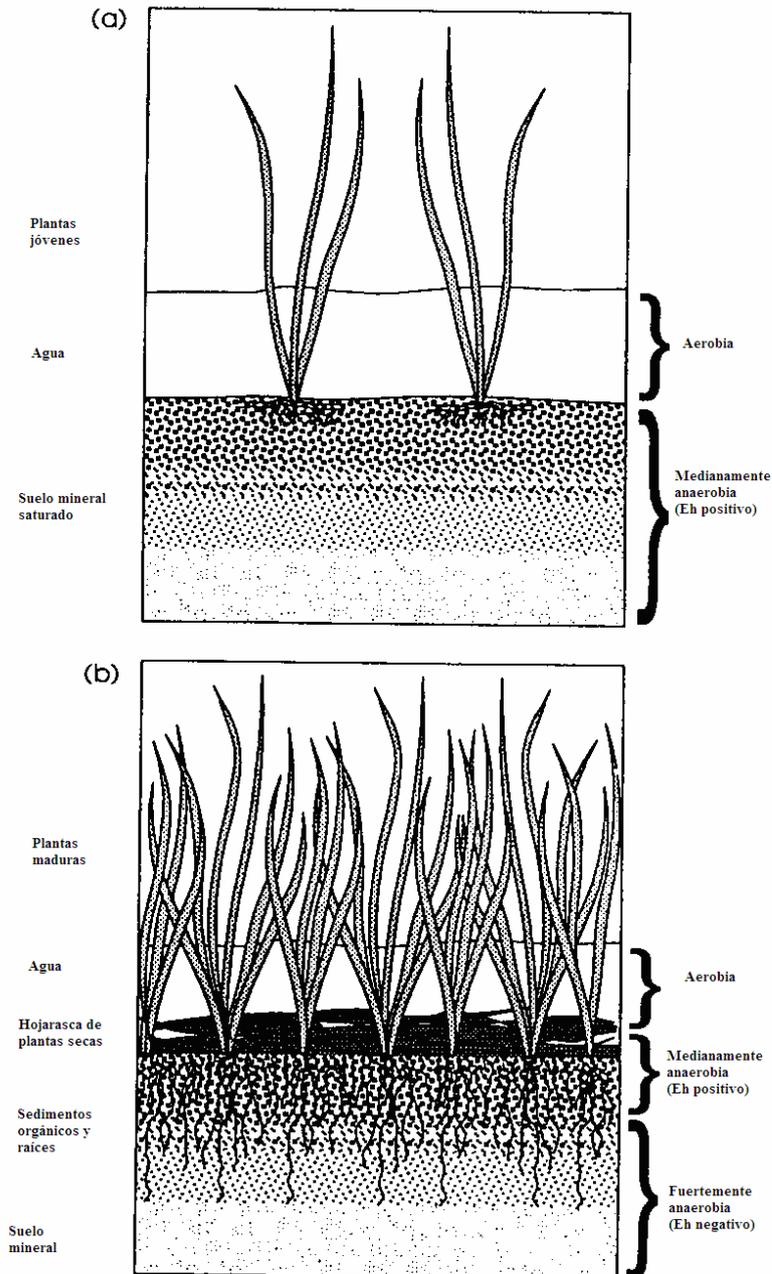


Figura 2.7. Etapas en la maduración del material de empaque de un humedal artificial: (a) recién plantado, (b) maduro

Fuente: (Kadlec y Knight, 1996)

Existen diferentes clasificaciones para los microorganismos dependiendo de la fuente de energía y carbono que utilicen, de su relación con el oxígeno y del régimen de temperatura preferido. Para efectos de estos sistemas únicamente se van a considerar las dos últimas clasificaciones (Davis y Cornwell, 1991).

En cuanto a su relación con el oxígeno se pueden encontrar microorganismos:

- *Aerobios estrictos*: este tipo de microorganismos utilizan al oxígeno como aceptor de electrones.
- *Anaerobios estrictos*: estos microorganismos no pueden sobrevivir en presencia de oxígeno. No pueden utilizar al oxígeno como aceptor de electrones.
- *Anaerobios/Aerobios o facultativos*: son aquellos microorganismos que pueden utilizar al oxígeno como aceptor de electrones, y bajo ciertas condiciones, logran desarrollarse en ausencia de oxígeno. Dentro de este tipo de microorganismos se encuentran los llamados desnitrificadores que, en condiciones anóxicas, utilizan como aceptores de electrones a los nitritos (NO_2^-) y los nitratos (NO_3^-).

En cuanto a los regímenes de temperatura preferidos:

- *Criófilos*: Este tipo de bacterias se logran reproducir en un rango de temperatura de -2 a 30°C.
- *Mesófilos*: Este tipo de bacterias se reproducen exitosamente en el rango de 25 a 40°C.
- *Termófilos*: Estas bacterias están presentes cuando la temperatura está en el rango de 45 a 60°C.
- *Esternotermófilos*: Estas bacterias únicamente se reproducen a temperaturas mayores de 60°C.

Muchos de los contaminantes presentes en el agua residual son eliminados a través de transformaciones microbianas, las cuales se ven afectadas por las concentraciones de los reactivos, el potencial redox y el pH del material de empaque.

En los HA, la mayoría de las transformaciones realizadas por los microorganismos para eliminar los contaminantes, se controlan por enzimas que funcionan como un catalizador en dichas reacciones.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y puede permanecer inactivos durante años (Lara-Borrero, 2006).

2.4.4. Vegetación emergente

Las macrofitas en los HA tienen diferentes funciones que ayudan a mejorar la calidad del agua residual a través de sus tejidos y raíces, entre las principales se encuentran las que se enlistan en la **Tabla 2.1**.

2.5 FUNCIONAMIENTO

Como se mencionó en la introducción, los sistemas naturales están provistos de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que les permiten remover en cierto grado los principales contaminantes presentes en el agua residual. De acuerdo con lo anterior, se puede decir que los humedales son una mezcla compleja de agua, sustrato, plantas, hojarasca, invertebrados y microorganismos; que son los responsables de llevar a cabo los mecanismos necesarios para mejorar la calidad del agua a través de distintas interacciones entre ellos. Estos mecanismos incluyen (IWA, 2000):

- Sedimentación de materia suspendida
- Filtración y precipitación química a través del contacto del agua con el sustrato y la hojarasca
- Transformación química
- Adsorción e intercambio iónico en la superficie de las plantas, sustrato, sedimentos y hojarasca
- Descomposición, transformación y absorción de los contaminantes y nutrientes a través de las plantas y los microorganismos
- Depredación y extinción de patógenos

Tabla 2.1. Funciones principales de las macrofitas en los HA

Propiedad de la macrofitas	Función en el proceso de tratamiento	Efecto obtenido
Tejido aéreo de las plantas	Atenuación de la luz solar Influencia en el microclima Reducción en la velocidad del viento Mejoramiento de la apariencia del sistema Almacenamiento de nutrientes	Reducción del crecimiento del fitoplancton Aislamiento durante el invierno y disminución de la temperatura en verano Reduce el riesgo de resuspensión de los sólidos sedimentables y mejora la remoción de los mismos Estético y de calidad de vida Menos daños al ambiente
Tejido de las plantas dentro del agua	Filtración Reducción de la velocidad del agua Proporciona área superficial para que se adhieran las bacterias y secreción de oxígeno fotosintético Toma de nutrientes	Filtra desechos grandes Aumenta la velocidad de sedimentación de los sólidos y disminuye el riesgo de resuspensión, además aumenta el tiempo de residencia hidráulico en el sistema Incremento de la degradación aerobia Los nutrientes se emplean por las plantas para su crecimiento y reproducción
Raíces y rizomas en el sedimento	Proporciona área superficial para que se adhieran bacterias y otros microorganismos Estabilización de la superficie del sedimento Previene la coagulación en los sistemas de flujo vertical Liberación de oxígeno Asimilación de nutrientes Liberación de antibióticos	Reduce el área total del sistema Disminuye la erosión del suelo El crecimiento de las plantas y su movimiento abre espacios en el sustrato Incremento de la degradación aerobia de la materia orgánica y de la nitrificación por el aumento de bacterias nitrificantes Reducción de contaminantes Eliminación de microorganismos patógenos

Fuente: Modificada de Brix (1997)

Todos estos mecanismos pueden dividirse de acuerdo a la naturaleza del proceso que llevan a cabo ya sean físicos, químicos o biológicos.

2.5.1. Procesos físicos

Los principales procesos físicos que tienen lugar dentro de los HA para mejorar la calidad del agua son: sedimentación, filtración, adsorción y volatilización. Dichos procesos ayudan a la remoción de sólidos sedimentables y coloidales principalmente, en menor grado, ayudan a la remoción de nitrógeno, fósforo, metales, materia orgánica y organismos patógenos.

2.5.2. Procesos químicos

Dentro de los HA también se llevan a cabo diferentes procesos químicos como la precipitación, adsorción y descomposición o alteración de compuestos menos estables por medio de fenómenos como la irradiación de luz UV y reacciones de óxido-reducción. A través de estos procesos se pueden remover en mayor grado contaminantes como el fósforo, metales pesados y algunos compuestos orgánicos.

2.5.3. Procesos biológicos

En este tipo de sistemas, los procesos biológicos son de gran importancia para la remoción de contaminantes presentes en el agua, entre los procesos principales se encuentran el metabolismo microbiano y de las plantas, así como, la absorción de nutrientes por parte de las plantas y el exterminio o muerte natural. Todos estos procesos van a ayudar a disminuir las concentraciones de los sólidos coloidales, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y organismos patógenos.

2.6. REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Para lograr un tratamiento integral que ayude a mejorar la calidad del agua es necesario que los procesos físicos, químicos y biológicos se lleven a cabo simultáneamente, dependiendo del tipo de contaminantes presentes en el agua residual. Dentro del agua residual los compuestos orgánicos se conforman principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y en algunos casos nitrógeno.

En los HA también se utiliza el carbono atmosférico (CO_2) para producir oxígeno y compuestos orgánicos disueltos durante el crecimiento, muerte y descomposición parcial de las macrofitas dentro del humedal.

La descomposición anaerobia de azúcares, almidones y celulosas de bajo peso molecular presente en las plantas muertas dentro del humedales produce gases como CH_4 y CO_2 (Kadlec y Knight, 1996).

La acumulación de carbono orgánico en un humedal resulta del balance entre la producción primaria (fotosíntesis) y la respiración. La materia orgánica que se produce se deposita en forma temporal en la superficie del suelo en forma de detritus y eventualmente ésta sirve de sustrato que proveerá de nutrientes a microorganismos.

Además de la producción interna de carbono mencionada, los efluentes también contienen carbono disuelto y particulado (Reddy y D'Angelo, 1997).

Por otra parte, el carbono contenido en la hojarasca es uno de los aportes principales de éste nutriente a un humedal mediante la conversión de moléculas orgánicas complejas a constituyentes orgánicos o inorgánicos simples.

Dicha descomposición se lleva a cabo a través de procesos físicos como la fragmentación, lixiviación, precipitación química, asimilación de nutrientes por las plantas, solubilización, así como sedimentación y volatilización.

También se incluyen procesos químicos y las reacciones en las que intervienen microorganismos; entre éstas se encuentran la mineralización, asimilación de los nutrientes por los microorganismos, la respiración, metanogénesis y la oxidación del metano.

Este proceso se muestra de forma detallada en la **Figura 2.8**.

La descomposición del carbono dentro de los HA se puede representar a través de diferentes reacciones dependiendo de la profundidad del suelo y la presencia o ausencia de oxígeno.

De acuerdo con los compuestos que forman en mayor parte la materia orgánica en el agua residual, las principales reacciones de descomposición se presentan a continuación.

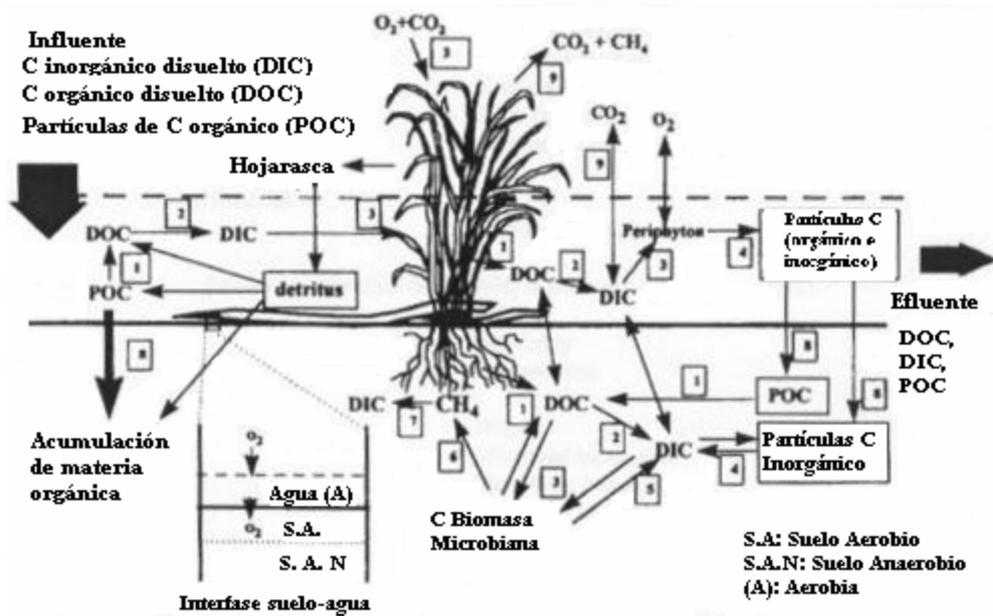
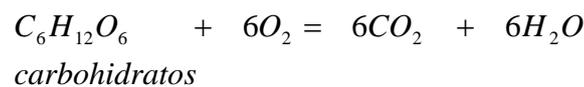


Figura 2.8. Transformaciones que sufre el carbono en el material de empaque y la columna de agua de los humedales. [1) fragmentación y lixiviación, 2) mineralización, 3) asimilación plantas/microorganismos, 4) precipitación y solubilización, 5) respiración, 6) metanogénesis, 7) oxidación del metano, 8) sedimentación, y 9) volatilización]

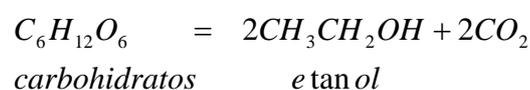
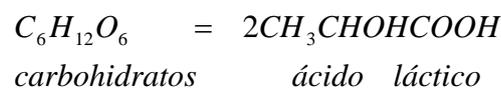
Fuente: (Reddy y D'Angelo, 1997)

En la zona aerobia se lleva a cabo la *respiración*:

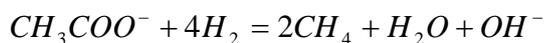
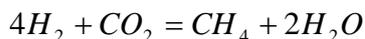


En la zona anaerobia se llevan a cabo una gran variedad de procesos, ya sea en la zona facultativa o en la zona anaerobia; entre las principales reacciones se encuentran:

“Fermentación” o degradación de moléculas complejas

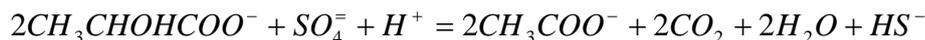


Metanogénesis



acetato

Reducción de sulfatos



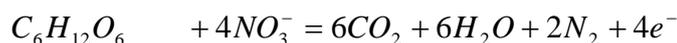
lactato

acetato



acetato

Reducción de nitratos (desnitrificación)



carbohidratos

Reducción de hierro



acetato

De esta forma, como se muestra en la **Figura 2.9**, se observa que dentro de los HA existen diferentes rutas para la descomposición y utilización de la materia orgánica.

2.6.1. Determinación del contenido de materia orgánica

Se han desarrollado diferentes técnicas para determinar el contenido de materia orgánica en aguas residuales.

En general, las pruebas pueden dividirse en aquellas que miden concentraciones de materia orgánica mayores que 1 mg/L y aquellas que miden trazas de materia orgánica, en el rango de 10^{-12} a 10^{-3} mg/L.

Los métodos de laboratorio, comúnmente utilizan el primer tipo de pruebas que en aguas residuales incluyen: (1) demanda bioquímica de oxígeno, (2) demanda química de oxígeno y (3) carbono orgánico total (Metcalf y Eddy, 1991).

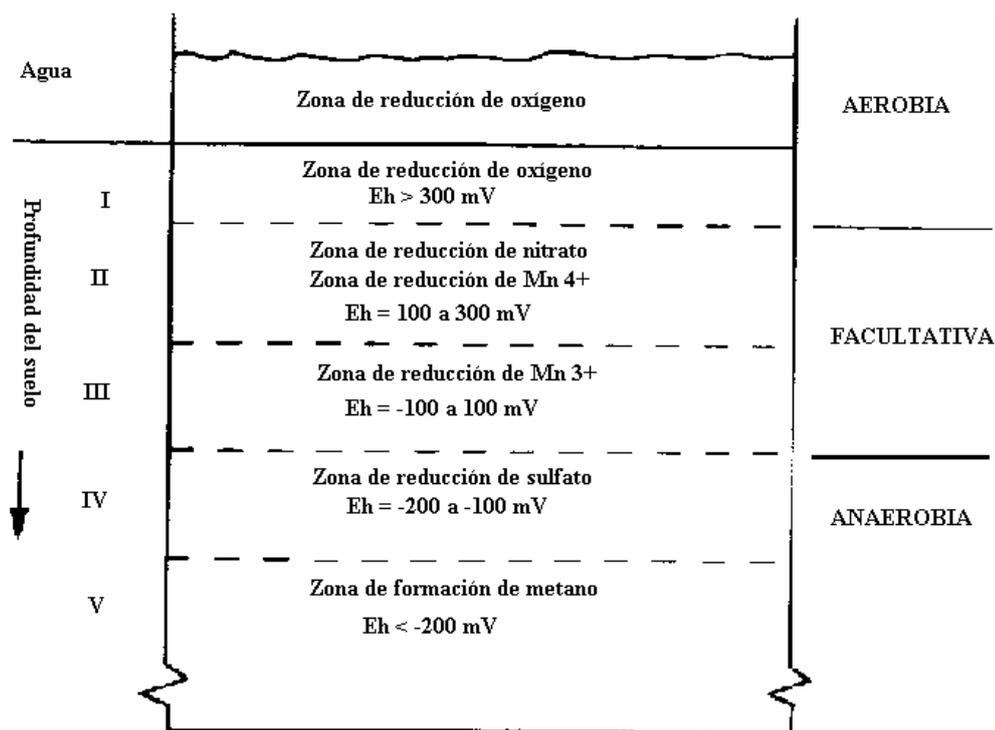


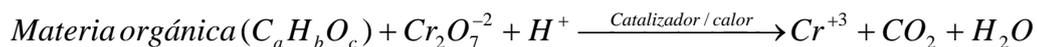
Figura 2.9. Perfil de las rutas para la descomposición de la materia orgánica en el material de empaque de los HA
Fuente: (Kadlec y Knight, 1996)

2.6.1.1. Demanda química de oxígeno

La determinación de DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte, el dicromato de potasio es el agente oxidante usado hoy en día en esta prueba, por ser el más práctico y por que produce resultados reproducibles y es capaz de oxidar una gran variedad de sustancias orgánicas casi completamente a CO₂ y agua (Romero-Rojas, 1999).

Este ensayo se lleva a cabo a altas temperaturas y se utiliza como catalizador al sulfato de plata para ayudar a la oxidación de algunos tipos de compuestos orgánicos.

La reacción general que tiene lugar al realizar esta prueba es la siguiente:



Este parámetro es muy útil para determinar la eficiencia de la unidad de tratamiento, ya que se determina en poco tiempo y no presenta interferencias de gran importancia como algunos ensayos biológicos. Debido a esto ha cobrado importancia en años recientes ya que es de gran ayuda para el control y operación de las plantas de tratamiento.

2.6.1.2. Demanda bioquímica de oxígeno

El parámetro más ampliamente utilizado para medir la cantidad de contaminantes orgánicos presentes en aguas superficiales y residuales es la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅).

Esta determinación es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias, en un periodo de 5 días y a 20°C. Así, el ensayo de DBO₅ es un proceso de oxidación húmeda en el cual los organismos son el medio para oxidar la materia orgánica en CO₂ y agua (Romero-Rojas, 1999).

Es necesario garantizar que durante el ensayo exista suficiente oxígeno disuelto (OD) debido a que el ensayo cuantifica la cantidad de oxígeno que es consumido por los microorganismos al utilizar la materia orgánica presente en el agua residual. Además se deben proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo de las bacterias y eliminar cualquier sustancia tóxica que se encuentre presente en la muestra, con el fin de garantizar las condiciones ambientales adecuadas para que los microorganismos puedan desarrollarse y trabajar adecuadamente.

Los resultados de la prueba de DBO₅ se utilizan en la actualidad con diferentes fines: (1) para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requiere para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, (2) para determinar el tamaño de las instalaciones de tratamiento, (3) para medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y (4) para determinar el cumplimiento de los límites de descarga del agua residual (Metcalf y Eddy, 1991). Las principales limitantes del ensayo son las siguientes:

- Se requieren grandes cantidades de bacterias activas y adaptadas al medio.
- Cuando se tratan aguas con residuos tóxicos, se requiere un pretratamiento de la muestra, así como la inhibición de la nitrificación.
- Únicamente se pueden medir los compuestos orgánicos biodegradables.
- El ensayo no tiene validez estequiométrica después de que la materia orgánica soluble presente en la solución ha sido consumida.
- Se requiere un largo periodo de tiempo (5 días) para obtener algún resultado, además este tiempo puede no corresponder al punto donde la materia orgánica soluble presente haya sido utilizada.

2.7. FACTORES QUE INFLUYEN EN SU FUNCIONAMIENTO

Existen diferentes factores que van a influir en el correcto funcionamiento de los HA, como lo son la temperatura, el tipo de material de empaque, pH, oxígeno disuelto, diseño, estaciones del año, tipo de planta, entre muchos otros.

2.7.1. Temperatura

Dentro de los HA las variaciones en la temperatura son de gran importancia ya que la mayoría de los procesos bioquímicos que tienen lugar en estos sistemas son dependientes o sensibles a la temperatura, debido a que los microorganismos encargados de llevar a cabo la remoción de contaminantes tienen cierto rango de temperatura al cual están adaptados, como se mencionó anteriormente.

Además la variación en la temperatura del efluente de los HA va a ser de interés dependiendo del uso que se piense dar a dicha agua tratada.

Por otro lado, este factor va a afectar de forma diferente a los distintos tipos de humedales artificiales existentes, es decir, afectará de manera diferente al tipo de planta que se este utilizando dentro del sistema.

2.7.2. Valor de pH

La parte química y biológica de los HA guarda una fuerte dependencia con este parámetro.

Muchas de las bacterias encargadas de remover los contaminantes en el agua residual no pueden existir fuera del rango de $4.0 < \text{pH} < 9.5$. (Metcalf y Eddy, 1991). Podemos poner por ejemplo, las bacterias desnitrificadoras operan mejor en el rango de $6.5 < \text{pH} < 7.5$, y las nitrificadoras prefieren $\text{pH} = 7.2$ y mayores. Los mismos principios pueden aplicar a otra biota presente en los humedales (Kadlec y Knight, 1996).

Por otro lado, el pH no sólo controla los procesos biológicos que se llevan a cabo en estos sistemas, sino que también determinan gran cantidad de las reacciones químicas que ocurren dentro de los HA.

Los valores de pH que se presentan en forma típica en los HA se mantienen cerca de la neutralidad o ligeramente ácidos.

El pH tiene gran influencia en las especies de los compuestos presentes en el agua y de esa manera, afectara en la asimilación y efectos como toxicidad para las plantas y microorganismos.

2.7.3. Oxígeno disuelto

Las raíces de las plantas vasculares requieren llevar a cabo un intercambio de gases para obtener oxígeno, necesario para la respiración; y además para liberar gases como el CO_2 , que se pueden acumular durante el metabolismo (Kadlec y Knight, 1996).

El oxígeno es un producto de la fotosíntesis, la cual al llevarse a cabo bajo la superficie del agua, ayuda a que el oxígeno se adhiera al agua de forma interna.

La concentración de oxígeno disuelto (OD) depende de la temperatura del agua, las sales disueltas y la actividad biológica.

Las condiciones de inundación y oxígeno limitado cambian rápidamente las propiedades del sustrato, permitiendo la acumulación de gases tóxicos como el ácido sulfhídrico (H_2S) y algunos iones como el hierro y el manganeso (Kadlec y Knight, 1996).

Como se mencionó anteriormente, la vegetación típica de los humedales requiere oxígeno en la zona de la raíz para su respiración, por lo cual estas

cuentan con vías respiratorias en sus raíces que se encuentran por encima del agua, estos conductos se conocen como “aerenquima” y se encargan de transportar los gases (O_2 , CO_2 y CH_4) en grandes cantidades, entre la atmósfera y la zona radicular del humedal.

Los principales mecanismos por medio de los cuales se transporta el oxígeno dentro de las macrofitas son: difusión molecular y flujo convectivo de aire a través de los espacios internos de dichas plantas. En la **Figura 2.10**, se puede observar el transporte de los gases antes mencionados dentro de las plantas vasculares.

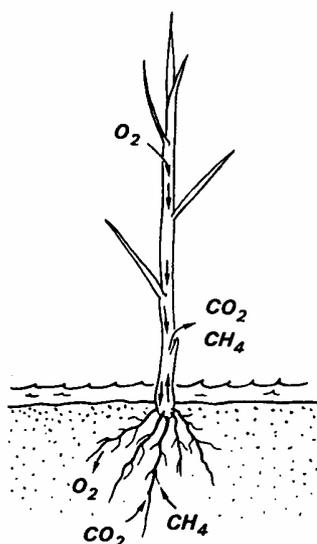


Figura 2.10. Transporte de gases dentro de las macrofitas

Fuente: (Brix, 1993b)

Este parámetro es muy importante dentro de los HA ya que la presencia o ausencia de este va a determinar si tienen lugar reacciones de oxidación o reducción, por medio de las cuales se lleva a cabo la depuración del agua residual.

2.7.4. Tipo de material de empaque

El tipo de material de empaque presente en un HA es de gran importancia debido a que de acuerdo a este varía la capacidad de retención de los contaminantes presentes en el agua residual.

Si el material de empaque no es satisfactorio para el desarrollo microbiano y de la vegetación, el humedal no puede tener una población de plantas

adecuada. ya que éste sirve de soporte tanto para las plantas como para los microorganismos. Además el conocimiento de la composición física y química de dicho material es esencial para predecir los procesos físicos y químicos que tendrán lugar internamente en el sistema.

Por otro lado, la remoción de elementos como el fósforo y los metales pesados se ve afectada por la acumulación de materia orgánica en el material de empaque, la cual con el paso del tiempo terminará formando una nueva capa del mismo.

Entre los factores ambientales que afectan la naturaleza del material de empaque se puede mencionar el pH, la concentración de oxígeno disuelto y naturaleza del mismo.

2.7.5. Estaciones del año

Las diferentes estaciones del año afectan de distintas maneras la operación de los HA y los efectos son diferentes para cada tipo de humedal.

Anteriormente se ha explicado el efecto de la temperatura en el funcionamiento de este tipo de sistemas, pero las bajas temperaturas sostenidas y la resultante formación de hielo, podrían conllevar en caso extremo, a la falla física del humedal (Lara-Borrero, 2006).

Debido a la dependencia de la temperatura que muestran los procesos por medio de los cuales se lleva a cabo la remoción de nitrógeno y de materia orgánica biodegradable se cree que la eficiencia de los HA para remover dichos contaminantes disminuirá en invierno.

No obstante, en muchos casos, el rendimiento de remoción de estos parámetros en sistemas de humedales existentes en climas fríos no ha demostrado una relación obvia de dependencia de la temperatura.

Esto puede ser causado por el largo tiempo de residencia en estos sistemas tendiente a compensar las bajas relaciones de reacción durante los meses de invierno (Lara-Borrero, 2006).

Durante el periodo de lluvias, los HA pueden sufrir de inundaciones que afectan la operación del mismo y modifican las características del influente y, naturalmente, las del efluente (efectos de dilución), así como la eficiencia de remoción.

2.7.6. Diseño

El criterio de diseño de los HA debe basarse en los contaminantes específicos que se piensan remover, los factores ambientales que pueden afectar a la remoción de dichos contaminantes y el grado de pretratamiento del agua residual necesario para la implementación del sistema (Guido-Zárate, 2006b).

En la **Tabla 2.2** se muestran los pasos a seguir para el diseño de un HA.

Tabla 2.2. Pasos a seguir para el diseño de un humedal artificial

Paso de diseño	Comentario
1. Objetivo del tratamiento	<i>Se deben definir los contaminantes que se quieren remover y el grado de remoción requerido</i>
2. Evaluación y selección del sitio	<i>Topografía, suelo, riesgo de inundación, uso de suelo existente, clima</i>
3. Determinación del nivel de pretratamiento	<i>El grado de pretratamiento depende de los requerimientos del efluente y la capacidad de remoción del sistema natura en particular</i>
4. Selección y manejo de la vegetación	<i>Espadañas, carrizos, juncos, espadaña común, juncias, achiras, jacintos de agua, lenteja de agua, etc.</i>
5. Determinación de parámetros de diseño	<i>Tiempo de retención hidráulico, profundidad del agua, geometría de la cuenca, capacidad de carga DBO, capacidad de carga hidráulica (superficial y sección transversal)</i>
6. Medidas de vector de control	<i>Control biológico y/o químico</i>
7. Diseño detallado de los componentes del sistema	<i>Preparación de planos detallados y especificaciones</i>
8. Determinación de los requerimientos de monitoreo y mantenimiento	<i>Depende de la agencia de control local y los requerimientos de control del proceso</i>

Fuente: Tabla modificada de Tchobanoglous (1996)

Los principales criterios de diseño para un HA son el tiempo de residencia hidráulica, TRH, la capacidad de carga orgánica, el área superficial requerida y la profundidad del agua en el sistema.

Otras consideraciones de diseño importantes incluyen aspectos como la relación longitud/ancho, consideraciones hidráulicas, consideraciones térmicas y cosecha de la vegetación (Guido-Zárate, 2006b).

2.7.7. Tipo de planta

No todas las especies de planta pueden remover contaminantes de las aguas residuales de manera similar ya que muchas de ellas son sensibles a ciertos compuestos tóxicos (NH_3 , Cl_2 , H_2S y metales pesados como el Cr^{6+}), a las deficiencias de oxígeno, a las variaciones del nivel de agua y por supuesto a los factores climáticos como las lluvias, temperatura. Como se mencionó anteriormente, no todas las plantas tienen la misma capacidad de penetración dentro de los humedales. Este factor tiene gran importancia ya que cuando una especie en particular logra una penetración mayor, habrá una mayor área dentro del HA donde el oxígeno estará presente y viceversa. Algunas especies de plantas secretan antibióticos que son letales para cierto tipo de microorganismos y, por consiguiente, afectan su desarrollo y actividad en los procesos de degradación de la materia orgánica.

Con base en estas consideraciones, a continuación se presenta la metodología seguida para alcanzar las metas y el objetivo propuestos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. SISTEMA EN ESTUDIO

El humedal artificial en estudio se encuentra en el sur de la Ciudad de México, en las instalaciones del parque conocido como Vivero Forestal de Coyoacán (Viveros de Coyoacán), sobre la avenida de la Universidad en la colonia Barrio de Santa Catarina. Este sistema es de flujo horizontal subsuperficial.

El sistema tiene las siguientes dimensiones: Largo, 15 metros, ancho, 5 metros y 0.7 metros de profundidad en promedio (con una inclinación de 6°). El lecho o medio de soporte está conformado por escoria volcánica (tezontle), distribuida uniformemente con un diámetro de partícula de 12.7 mm. El lecho está dentro de una alberca recubierta por muros de concreto, los cuales están cubiertos con una geomembrana de polipropileno (**Figura 3.1.**). La porosidad promedio del medio de soporte es del 48%. Las plantas predominantes en el HA son los carrizos (*Phragmites australis*) aunque también se encuentran algunos papiros (*Cyperus papyrus*) (Rodríguez y Varela, 2003).

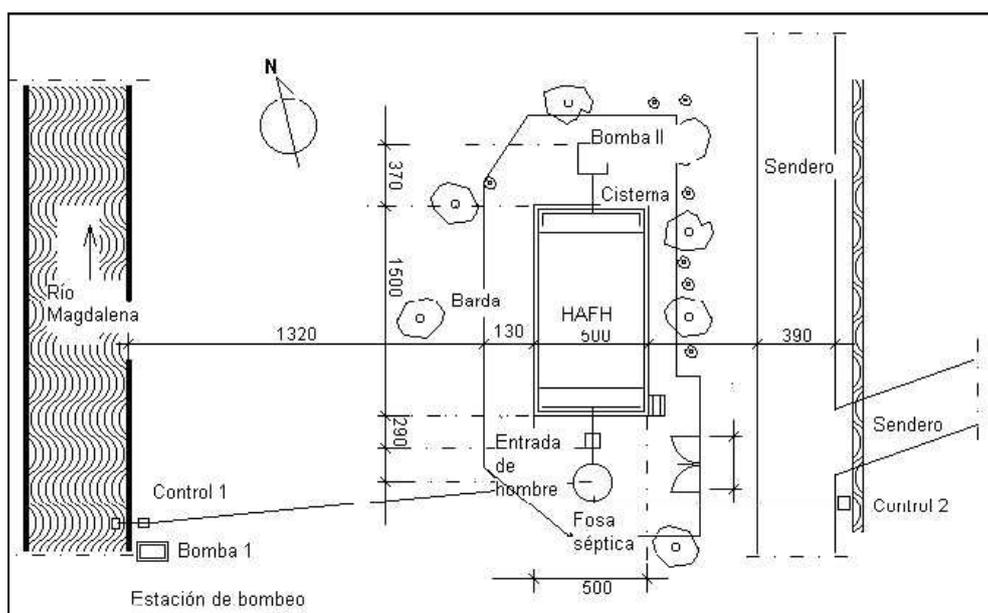


Figura 3.1. Diagrama de las dimensiones del HAFH

Fuente: (Durán-de-Bazúa y col., 2003)

Este humedal recibe aguas residuales del río Magdalena. El afluente del mismo proviene de la Sierra de las Cruces, alimentándolo con aguas cristalinas de diversos manantiales durante todo el año; al pasar por el poblado de San Nicolás Totolapan recibe el caudal del antiguo Río Eslava, consistente en el agua residual captada de los múltiples fraccionamientos construidos en el Ajusco. Posteriormente, atraviesa el Periférico y desciende al lado del Pedregal de San Ángel para entrar a la Presa Anzaldo. Aguas abajo, recibe las aguas de desecho de varias colonias como la de Fuentes del Pedregal y Santa Teresa. En algunos tramos, el río ha sido entubado y su superficie convertida en calles y avenidas. Precisamente al salir de este entubamiento, es como penetra en la Delegación Coyoacán por el sureste, cerca de los Viveros. Finalmente, se une al río Mixcoac, para formar conjuntamente el río Churubusco (Millán-Licona, 2006). Todo este recorrido y la ubicación del HA se muestran en la **Figura 3.2**.

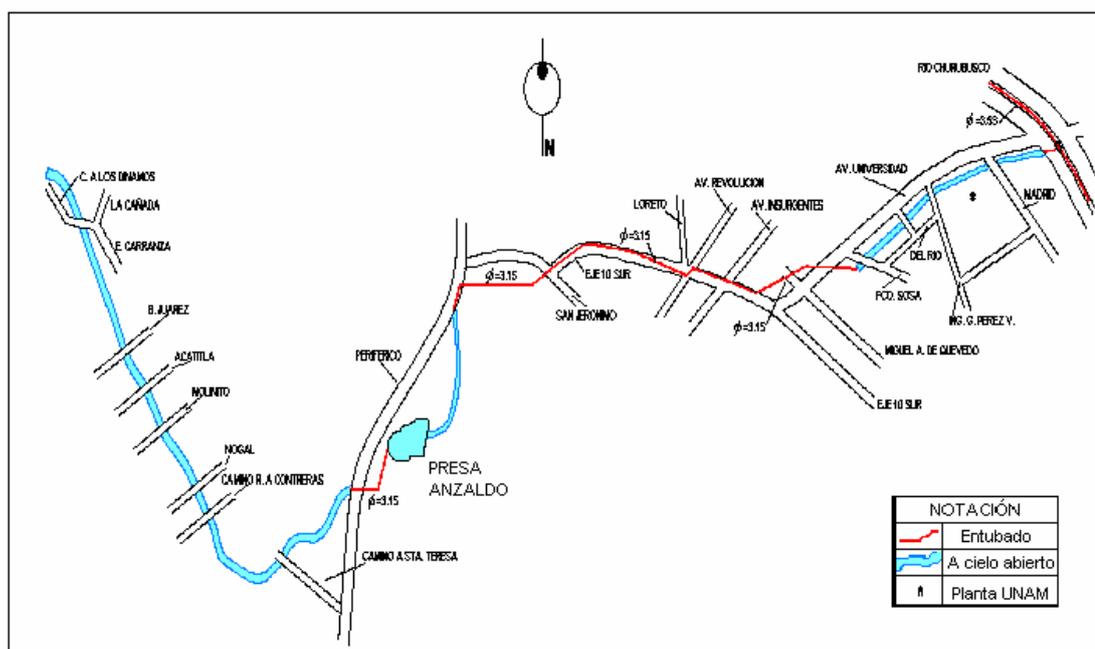


Figura 3.2. Esquema de flujo del río Magdalena desde su nacimiento

Fuente: (Durán-de-Bazúa y col, 2000).

El agua residual es succionada utilizando una bomba sumergible que descarga a un sedimentador primario (fosa séptica) que tiene una capacidad nominal de 1846 litros. Una vez dentro del sedimentador el tiempo de residencia del agua dentro del mismo fue de 30 minutos. El tiempo de residencia del agua en el

sistema se puede variar si se cambia la posición de la válvula de globo que controla el flujo de alimentación. El tiempo de residencia hidráulica puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

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

donde: L = Largo de la celda del humedal [m]

W = Ancho de la celda del humedal [m]

y = Profundidad de la celda del humedal [m]

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

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

t = TRH = Tiempo de residencia hidráulica [d]

De acuerdo con esta información, las condiciones de operación del sistema se muestran en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Condiciones de operación del HAFH

Posición de apertura en la válvula de alimentación	Flujo alimentado hacia el humedal	Tiempo de residencia hidráulico
Totalmente abierta	10.396 m ³ /día	2.42 días

El influente es alimentado en forma continua por uno de los extremos del sistema, donde comienza la pendiente del mismo. El sistema de alimentación es un tubo horizontal perforado, que está montado de manera tal que facilite la infiltración por gravedad al lecho del humedal. La distribución del agua residual dentro del humedal se efectúa en forma horizontal, hasta el nivel de inundación de 50 a 55 centímetros. De esta forma se busca eliminar caminos preferenciales que reduzcan el área real de transferencia de masa (Rodríguez y Varela, 2003). Finalmente el agua tratada es almacenada en una cisterna que tiene 1 metro de largo, 0.91 metros de ancho y 2 metros de profundidad. La altura máxima de descarga de la cisterna es de 0.55 metros. Dicha cisterna dispone de un sistema de descarga compuesto por un electronivel y una bomba de 0.5 HP de potencia. El agua que se desaloja de la cisterna se

descarga hacia los canales de distribución del Vivero Forestal de Coyoacán para el riego de los árboles.

En la **Figura 3.3** se muestra una representación esquemática del HAFH.

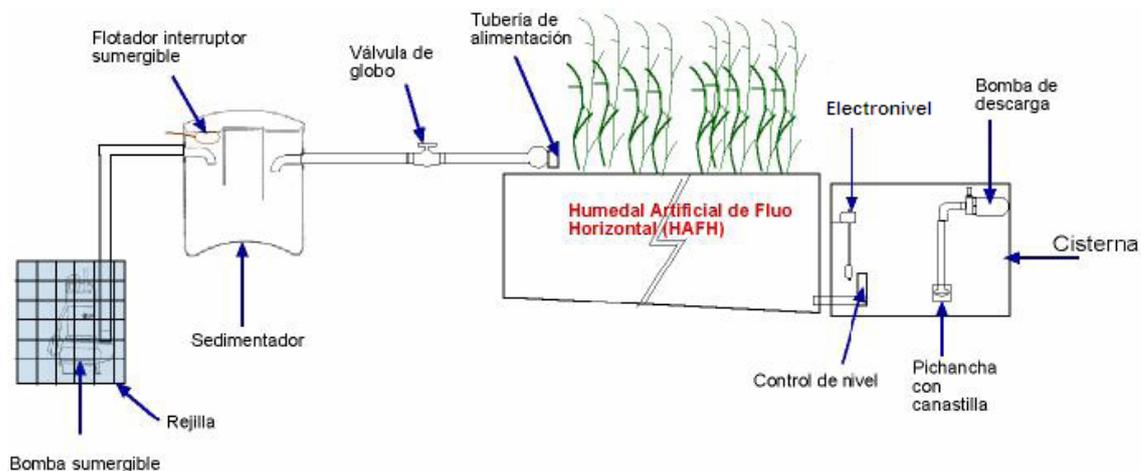


Figura 3.3. Representación esquemática de los equipos instalados en el HAFH

Fuente: (Durán-de-Bazúa y col., 2003)

3.2. PARÁMETROS EVALUADOS

En este sistema, se determinaron diversos parámetros para caracterizar el agua tratada a través de este humedal, además a través de algunos de estos parámetros se puede conocer la eficiencia del sistema. En el HAFH, se efectuaron tomas de muestras representativas tanto en el influente como en el efluente del sistema. A continuación, se explican en forma específica los parámetros evaluados.

3.2.1. Valor de pH

La determinación de este parámetro se llevó a cabo utilizando el equipo Corning Modelo Check-Mate II de campo de lujo modelo 475631, de acuerdo con las instrucciones del fabricante y a la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000 (DOF, 2000a) (**Anexo A.1.1.**). Las mediciones del pH se realizaron tres veces por semana a las dos horas aproximadamente después de haber tomado la muestra en contenedores de 1 litro de plástico con tapa.

3.2.2. Temperatura

Para su determinación se utilizó el equipo Corning Modelo Check-Mate II de campo de lujo modelo 475631, de acuerdo con las instrucciones del fabricante y a la Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000 (DOF, 2000b) (**Anexo A.1.2**).

3.2.3. Demanda química de oxígeno

La metodología empleada es una modificación del método oficial de la APHA-AWWA-WPCF (1989), propuesta por Oaxaca-Grande (1997), ver **Anexo A.1.3**. La DQO se realizó tres veces por semana una hora después de haber tomado la muestra y por triplicado.

3.2.4. Demanda bioquímica de oxígeno

La metodología utilizada para esta prueba fue la indicada por la norma NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001b), utilizando diluciones al 3.3% de la muestra obtenida. (**Anexo A.1.4**), modificando la temperatura a 25°C (ya que la temperatura del laboratorio donde está ubicado el equipo de incubación está a 22°C). Se trabajó con un blanco de agua con nutrientes y un frasco para la dilución en el afluente y el efluente, respectivamente. Estos frascos se realizaron por duplicado para colocar un lote a incubar en una incubadora orbital marca SEV durante 5 días a 25°C. De cada uno de estos frascos se tomaron alícuotas de 50 mL por duplicado para la determinación de oxígeno disuelto, de acuerdo con la norma NMX-AA-012-SCFI-2001 (DOF, 2001a) (**Anexo A.1.5**), a través del método yodométrico. Este parámetro no se incluye en la sección de análisis de los resultados ya que esta fuera de los alcances de esta investigación. Sólo se determinó como apoyo para la discusión y no como parámetro de control.

3.2.5. Altura promedio de las plantas

Este parámetro se estimó una vez a la semana, utilizando un flexómetro y en el caso de plantas muy altas un palo de dimensiones conocidas, se hizo un promedio de la altura de 12 plantas dentro del humedal. De esta forma, se busca observar el crecimiento gradual en las macrofitas durante el periodo de evaluación para relacionarlo con el grado de remoción de la materia orgánica obtenido a lo largo del período de evaluación.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Para poder obtener mediciones adecuadas de los parámetros evaluados, primeramente se verificó el estado general del sistema; así como de todos los equipos electromecánicos instalados en el mismo, ya que si se asegura su correcto funcionamiento, los resultados obtenidos para la evaluación de dichos parámetros tiene un alto grado de confiabilidad.

Además, un factor muy importante para el correcto funcionamiento de este humedal es la variabilidad de la composición del agua residual, debido a que el cauce del río Magdalena es contaminado principalmente por desechos domésticos, aunque en últimas fechas se ha optado por la introducción de agua tratada a dicho cauce, ya que la población que habita en las cercanías del río se queja del fuerte olor que desprende, así como de la mala apariencia que da a las zonas por donde fluye.

El período de evaluación de los parámetros de control abarca del 20 de abril al 22 de junio de 2006. Los parámetros fisicoquímicos a lo largo de estos dos meses fueron: Valores de pH y demanda química de oxígeno. Por otro lado, también se realizó un ensayo bioquímico midiendo la demanda bioquímica de oxígeno y como parámetro físico solamente la temperatura.

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL HAFH

Los resultados obtenidos en el HAFH se muestran de manera gráfica en las Figuras 4.1 a 4.3.

4.1.1. Valores de pH en el HAFH

Como se puede observar en la **Figura 4.1** el comportamiento del pH en el sistema presenta pequeñas variaciones tanto en el influente como en el efluente. En el influente, el máximo valor alcanzado fue 7.43 y el valor mínimo fue 6.94. En cuanto al efluente del sistema el máximo valor registrado fue 7.05 y el valor mínimo fue 6.29 unidades de pH. Esta disminución en el pH demuestra que dentro del HA se está llevando a cabo la generación de ácidos

producto de la degradación de la materia orgánica (ácidos orgánicos). Durante el período de evaluación se presentaron cambios en la composición del agua residual, ya que se comenzó a hacer presente en forma más clara el factor de dilución de los contaminantes en el agua debido a que la época de lluvias se inició de forma muy intensa (a partir de la segunda semana de mayo).

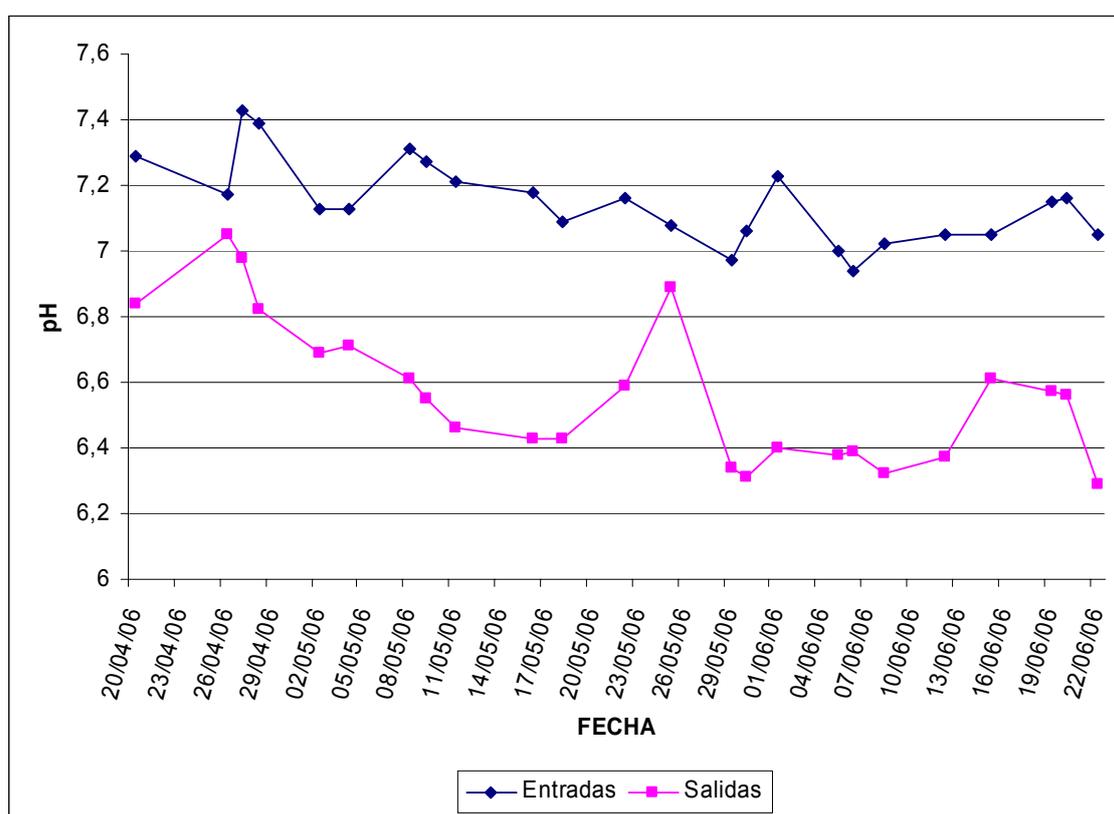


Figura 4.1. Comportamiento del pH en el HAFH

El valor promedio del pH en el influente y el efluente durante todo el periodo de evaluación fue 7.14 y 6.56, respectivamente.

Durante el periodo de experimentación, se pudo observar una tendencia decreciente en el pH en el efluente. Este hecho es muy probable que se deba a que previo al arranque del HA, este sistema no operaba de manera constante y permanecía sin alimentación por periodos prolongados de tiempo debido a que las autoridades del Gobierno del Distrito Federal desviaban el caudal del río Magdalena y no llegaba agua al sistema de bombeo del humedal artificial. Además, las lluvias intensas cuyos valores de pH son menores 7.0, también contribuyen a esta reducción del pH. Esta tendencia se ve en la operación del

sistema ahora que ya es alimentado de manera constante y se tiene una relativa estabilización en los últimos días de la etapa experimental.

4.1.2. Temperaturas en el HAFH

La **Figura 4.2** muestra el comportamiento de la temperatura en el sistema. De acuerdo a esta, podemos observar que el valor máximo de la temperatura en el influente fue 23.8°C, mientras que la temperatura mínima en el mismo fue de 18.7°C.

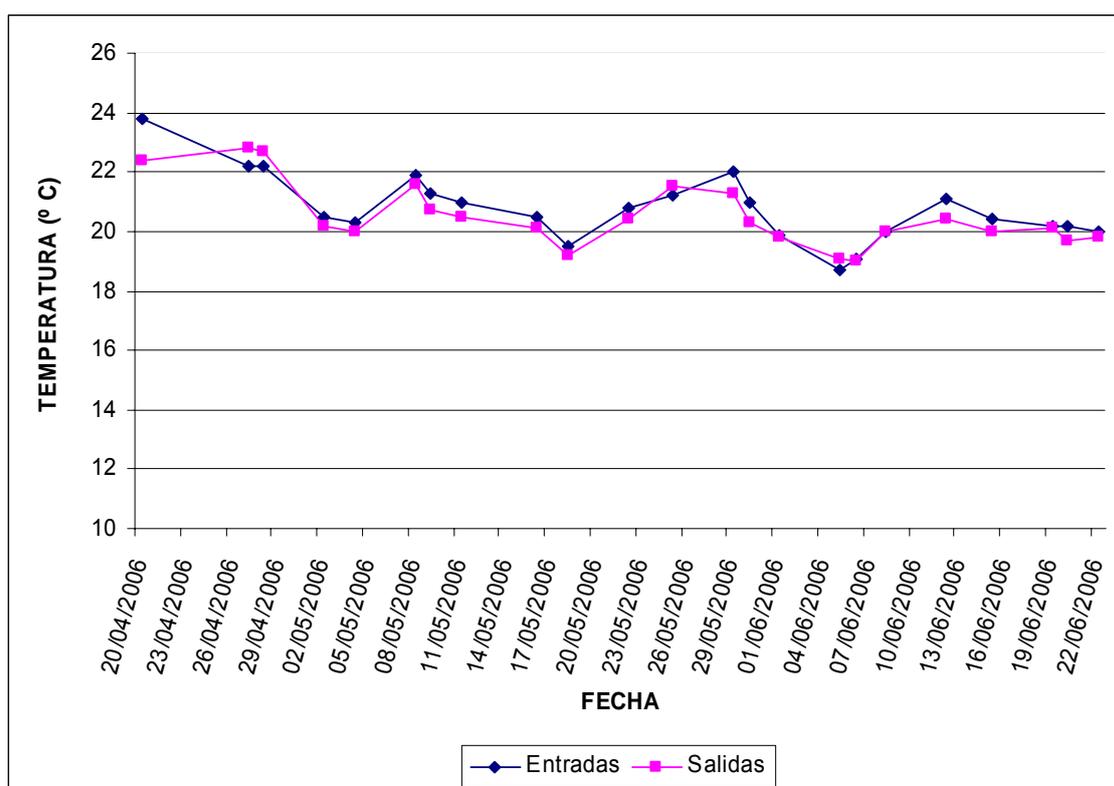


Figura 4.2. Comportamiento de la temperatura en el HAFH

Por otro lado, en el efluente las temperaturas máxima y mínima fueron de 22.8 y 19.1°C, respectivamente. La mayoría de las mediciones se realizaron alrededor del medio día, con excepción de la muestra del día 26 de abril de 2006, ya que la muestra permaneció en el cuarto frío por unas horas para su conservación debido a problemas técnicos que impidieron llevar a cabo el análisis a la misma hora que las muestras restantes.

De la misma figura, se puede observar que no existen diferencias marcadas entre la temperatura del influente y la temperatura del efluente, es decir, este parámetro no tuvo un efecto importante en el sistema.

4.1.3. Demanda química de oxígeno en el HAFH

El comportamiento de este parámetro mostró una alta tendencia al cambio ya que la composición del agua residual proveniente del río Magdalena ha estado siendo muy variable, a diferencia de las etapas anteriores de investigación (Kneidinger, 1996; Schaller, 1998), en las que la composición química de los contaminantes del río Magdalena eran relativamente constantes, ya que este parámetro depende totalmente de estos factores.

Como se puede observar en la **Figura 4.3**, el sistema sigue una tendencia a remover la materia orgánica a partir del 20 de abril al 29 de mayo, ya que durante este tiempo el sistema estuvo funcionando en forma continua y sin problemas de consideración.

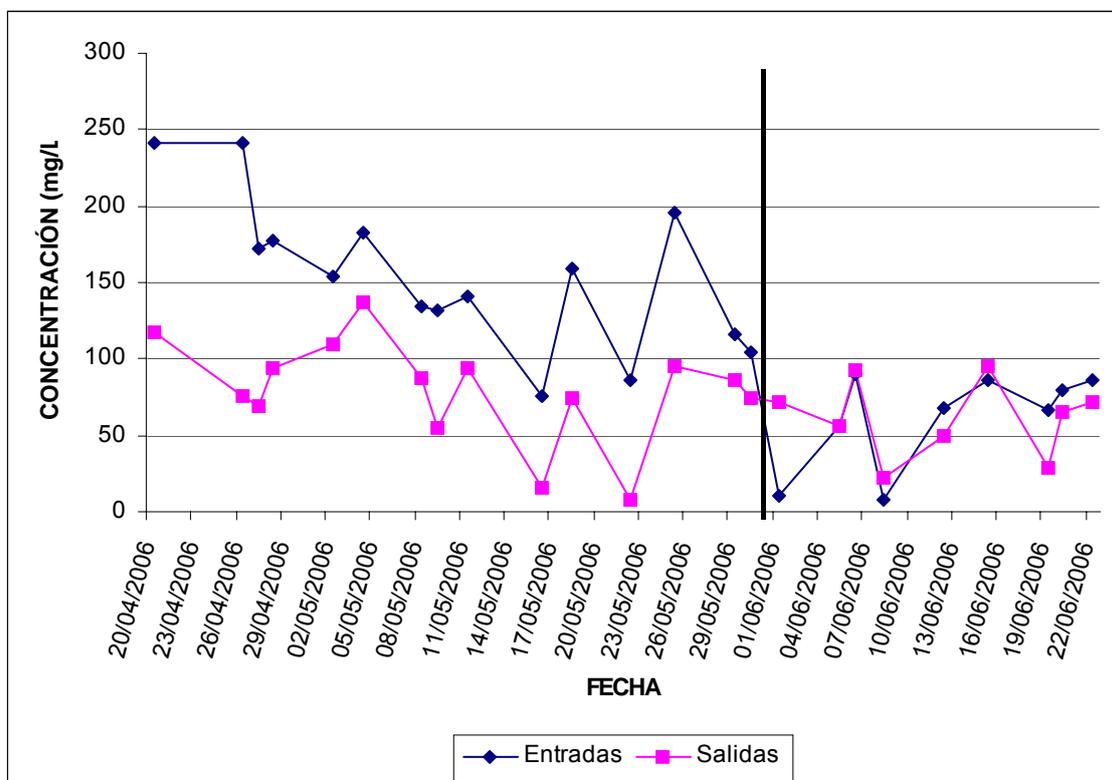


Figura 4.3. Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el HAFH

De la misma manera que el diagrama de pH (**Figura 4.1**), la demanda química de oxígeno tiene una tendencia a estabilizarse.

Los valores obtenidos para los días 16 y 22 de mayo se pueden explicar porque en estas dos fechas el día anterior se presentaron lluvias torrenciales durante todo el día y la noche, por lo cual el factor de dilución hizo que los valores de materia orgánica presente en el influente y el efluente bajaran de forma significativa en comparación con los valores mostrados en las primeras semanas de evaluación.

En la misma figura, del día 1º al 7 de junio se puede observar que el valor de la DQO en el efluente es mayor que el mismo valor en el influente. La explicación puede ser debida al hecho de que como las lluvias reiteradas y torrenciales produjeron inundaciones severas en la ciudad, el personal técnico del Sistema de Aguas de la Ciudad de México desvió el cauce del Río Magdalena hacia el drenaje profundo de la Ciudad de México y, además, comenzó a enviar agua de otros sistemas al cauce del río y junto con la propia dilución de las lluvias que se presentaron sobre la superficie del humedal (75 m²), permitieron que la DQO del influente disminuyera considerablemente, observándose valores de DQO menores en el influente que en el efluente. Esto no quiere decir que, dentro del humedal, la DQO se esté incrementando sino que el sistema no alcanzó a registrar la disminución de la DQO en el efluente.

Si se obtiene un promedio de la DQO tanto de entrada como salida a nivel global se puede determinar la eficiencia total del sistema utilizando el tiempo de residencia hidráulico de 2.42 días, aunque es claro que recibiendo aguas residuales de composición tan variable, no se pueden obtener valores de eficiencia muy altos.

Con objeto de hacer una comparación entre el estado actual que guarda el sistema y el estado que presentaba durante el periodo de investigación llevado a cabo por Rodríguez y Varela (2003) se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Tomando en cuenta los tiempos de residencia utilizados por los autores anteriormente mencionados y el tiempo de residencia utilizado en esta investigación, se puede decir que, a un menor tiempo de residencia hidráulica, se tendría una mayor remoción de la DQO.
- Debido a la gran variación de la DQO que se presenta en el influente (como se presenta en la Figura 4.3) y a que el sistema no es capaz de registrar estos cambios de manera inmediata en la salida, es difícil hacer

una comparación más profunda entre los valores obtenidos en esta investigación y los obtenidos por los autores antes mencionados.

	ENTRADA	SALIDA
DQO PROMEDIO (mg/ L)	119.16	72.66

De acuerdo con esto, se puede obtener la eficiencia de remoción del sistema, η , a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = [(E - S) / E] * 100$$

donde:

E = Valor de DQO del influente del humedal

S = Valor de DQO del efluente del humedal

El HAFH logró remover la materia orgánica presente con una eficiencia de remoción del 39.02% en promedio durante el periodo de experimentación. Este valor es considerablemente menor a los obtenidos en otros estudios (durante los mismos meses Rodríguez y Varela en 2003 obtuvieron 65.45% de remoción promedio), lo cual habla de que las condiciones actuales en las que el sistema opera no son las óptimas para este periodo de experimentación. Sin embargo, para poder dar una opinión general del desempeño del sistema, es necesario que se lleven a cabo un estudio de la eficiencia de remoción de materia orgánica (medida como DQO y DBO₅) a lo largo de un año para poder registrar el comportamiento del sistema sometido a las variaciones estacionales.

4.1.4. Demanda bioquímica de oxígeno en el HAFH

Los resultados obtenidos para el ensayo de la demanda bioquímica de oxígeno se pueden observar en la **Tabla 4.1**, esta prueba se realizó durante un mes a partir del día 25 de mayo y hasta el día 22 de junio de 2006.

Tabla 4.1. Resultados de la DBO₅ en el HAFH

Fecha	Entrada (mg O ₂ /L)	Salida (mg O ₂ /L)
-------	--------------------------------	-------------------------------

25-Mayo-2006	137	102
1-Junio-2006	23	61
8-Junio-2006	35	47
15-Junio-2006	23	17
22-Junio-2006	26	12
Promedio	48.8	47.8

Como se puede apreciar en dicha tabla los valores obtenidos son igualmente variables, de acuerdo con las características del agua proveniente del río Magdalena. Además, aquí también se logra observar en las pruebas del 1° y 8 de junio en las que no se logró remover materia orgánica biodegradable sino que, por el contrario, se tuvo descomposición de la materia orgánica presente, con una clara acumulación en la salida (efluente). Esta tendencia también se encontró en la determinación de la DQO debido a los problemas técnicos que se presentaron en el humedal en estudio.

4.2. OTROS RESULTADOS IMPORTANTES

4.2.1. Altura promedio de las plantas en el HAFH

Los resultados obtenidos de este parámetro se muestran en la **Tabla 4.2**. La altura mínima en las plantas, es decir, al inicio de la evaluación fue de 2.05 m y la máxima altura registrada, el día 19 de junio fue de 3.05 m. Durante los dos meses de experimentación las plantas registraron un incremento de un metro en promedio en todo el humedal.

A lo largo del periodo de estudio del sistema se observó que la apariencia de las mismas mejoró y que aumentó la densidad de éstas dentro del humedal, en general, las macrofitas se desarrollaron adecuadamente, ya que éstas recibían agua residual de manera constante.

Tabla 4.2. Altura promedio de las plantas en el HAFH

<i>Fecha</i>	<i>Altura promedio de las plantas (m)</i>
20-Abril-2006	2.045

25-Abril-2006	2.047
2-Mayo-2006	2.268
8-Mayo-2006	2.356
16-Mayo-2006	2.526
22-Mayo-2006	2.684
1-Junio-2006	2.853
5-Junio-2006	2.883
12-Junio-2006	2.956
19-Junio-2006	3.050

Es importante mencionar, que el efecto del crecimiento de las mismas no fue un factor significativo en la remoción de materia orgánica ya que las variaciones en la carga orgánica del influente en períodos de tiempo muy cortos no permitían la rápida adaptación de las macrofitas a estos cambios. Además debido a que el sistema ya contaba con un sistema radicular desarrollado no se logró observar algún efecto en dicha remoción debido a este factor.

Se encuentra en proceso una investigación sobre la estabilización de los residuos del sedimentador primario del humedal (los cuales se conocen como lodos primarios), ya que contienen coliformes fecales y huevos de helmintos en cantidades muy elevadas: Coliformes fecales en lodos primarios del humedal de Viveros = 4×10^6 NMP/100 cm³ y huevos de helmintos en lodos del humedal de Viveros = 570 HH / 2g ST (Gaitán-Zamora, 2006).

Dado que estos lodos son un riesgo potencial por su composición química y microbiológica, para su estabilización con objeto de que no dañen el entorno y poder darles una disposición final adecuada, se están realizando pruebas de biodegradación en reactores de “composta” empleando, además, los residuos foliares y de las cañas de las hidrofítas que crecen dentro del humedal artificial (Gaitán-Zamora, 2006). En los resultados encontrados hasta el momento, se han logrado reducir los coliformes fecales en un 99% y los huevos de helmintos en un 50%, empleando proporciones lodos primarios:residuos foliares y de las cañas de 1:1 y 1:2 (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas microbiológicas al final de la biodegradación de lodos primarios y hojarasca del humedal del Vivero Forestal de Coyoacán (Gaitán-Zamora, 2006)

REACTOR	COLIFORMES FECALIS, NMP/100 cm³	HUEVOS DE HELMINTO HH/2 g sólidos totales	Porcentaje de reducción de CF	Porcentaje de reducción de HH
Lodos:Material foliar (1:2)	3 x 10 ⁴	267	99.25	53
Lodos:Material foliar (1:1)	3 x 10 ⁴	310	99.25	46

Por otro lado, el tiempo de residencia en el sedimentador primario y el humedal hace que los huevos de helmintos se inactiven: El 100% de ellos no fueron viables en las pruebas de incubación realizadas en esa investigación, lo que podría indicar que su estadía a las condiciones encontradas en el humedal los hace inviables reduciendo el problema de patogenicidad (Gaitán-Zamora, 2006).

La productividad según esta investigación de material foliar y cañas es de 184.95 kg/semestre, lo que plantea para los 75 m² de área un rendimiento de 2.5 kg/m² de biomasa verde (25 T/ha que puede usarse para alimento de ganado en las zonas rurales, para la elaboración de materiales de jarciería, etc.).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con base en el objetivo planteado para esta investigación de estudiar la remoción de la materia orgánica en un humedal artificial de flujo subsuperficial de tipo horizontal a escala prototipo, empacado con tezontle, plantado con carrizos y papiros para observar el estado actual que guarda el sistema experimental en estudio y las metas establecidas:

- Utilizar un tiempo de residencia hidráulico en el sistema experimental diferente a los usados en investigaciones anteriores para evaluar su funcionamiento.
- Comparar la remoción de la materia orgánica en el sistema experimental a través de las mediciones de demanda química de oxígeno.

y analizando los resultados obtenidos durante el período de investigación, donde el sistema fue capaz de remover materia orgánica (DQO) con una eficiencia de remoción promedio de 39%, se puede concluir que el humedal artificial en estudio logra remover la materia orgánica además de otros contaminantes que se encuentran en el agua residual en cantidades considerables (huevos de helminto y coliformes fecales).

Se puede concluir que la eficiencia de remoción de materia orgánica en el humedal sería mayor si no se hubiera tenido la enorme dilución ocasionada por las lluvias torrenciales de este año, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación y los obtenidos por Rodríguez y Varela (2003). El sistema “alcanzó” una estabilidad en términos de la DQO a las tres semanas de haberse arrancado.

En cuanto al tiempo de residencia hidráulico utilizado se puede concluir que, de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996 (Semarnat, 1996), el sistema

cumple con los valores de DBO máximos permisibles que se marcan para el uso del agua tratada con fines de riego agrícola por lo que no está habiendo daños ecológicos en el Vivero Forestal de Coyoacán por utilizar estos efluentes tratados. Aunque no se logró en este lapso de dos meses de operación estable alcanzar una eficiencia de remoción equivalente a la alcanzada en la investigación anterior (65% con un TRH de 2.7 y 5.3 d), se puede decir que el sistema está recuperado totalmente.

5.2. RECOMENDACIONES

A lo largo de esta investigación surgieron diferentes problemas de mantenimiento y operativos del sistema provocados por fallas en el suministro de agua residual y por el deterioro de los componentes de la instalación de los accesorios del humedal (sedimentador primario y sistemas de bombeo de alimentación y salida), a lo largo de estos años.

Entre los principales problemas se encuentra la inundación del sistema ya que en la época de lluvias, como está más abajo que el nivel del Vivero, no se cuenta con algún aditamento que ayude a la evacuación del agua en exceso, además del sistema de bombeo del agua tratada de salida.

Por otra parte, el hecho de que todos estos detalles se presenten a lo largo de una experimentación proporciona conocimientos para diseños futuros. Algunas sugerencias que pueden adaptarse a este sistema o tomarse en cuenta en futuras construcciones son:

- 1) Efectuar la construcción del HAFH a nivel del suelo y que el agua residual llegue por gravedad y no por bombeo
- 2) Contar con canales laterales que eviten deslaves e inundaciones provocadas por el reblandecimiento del terreno
- 3) Contar en el sedimentador primario con una válvula de purga de lodos y con ventilación adecuada para eliminar la acumulación de gases tóxicos o inflamables.
- 4) Evitar en lo posible el uso de equipos electromecánicos

- 5) Contar en el sistema con espacio suficiente para realizar mantenimiento
- 6) Instalar un equipo de bombeo sumergible en la cisterna para evitar problemas operativos
- 7) Se recomienda solicitar al personal técnico y administrativo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, que se disponga de una infraestructura civil dentro del Río Magdalena de tal suerte que siempre se disponga de un nivel adecuado para que el equipo de bombeo sumergido no tenga problemas y siempre se esté alimentando agua residual al sistema
- 8) Es necesario contar con un temporizador acoplado a la bomba de alimentación para poder tener un mejor control del flujo alimentado y como consecuencia del tiempo de residencia hidráulica.

En cuanto al mantenimiento preventivo y la operación adecuada del sistema, complementando lo ya existente (Durán-de-Bazúa y col., 2003), las recomendaciones son las siguientes:

- Realizar la limpieza de la malla protectora dentro del sedimentador primario cada quince días debido a que hay muchos residuos sólidos en el agua del río
- Purgar los lodos del sedimentador aproximadamente cada tres meses por la misma razón
- Podar las macrofitas cada seis meses o cuando alcancen una altura mayor a 2 metros
- Elaborar un calendario de adquisición de material eléctrico y electromecánico ya que el correcto funcionamiento de este sistema en particular está basado en un buen funcionamiento de sus partes eléctricas y electromecánicas
- Revisar la acometida principal del suministro de corriente eléctrica al sistema para asegurarse de que hay corriente eléctrica

- Revisar constantemente el nivel de agua en el río para asegurar el funcionamiento del equipo de bombeo sumergible
- Es necesario contar con un área exclusiva para el tratamiento de lodos y la elaboración de composta (Gaitán-Zamora, 2006)
- Dentro de estas recomendaciones cabe mencionar la necesidad de resolver los problemas a la brevedad posible sin tener que detener el funcionamiento del equipo o perturbar sus condiciones de operación.

Todo esto es especialmente importante a la luz de que el sistema tiene como finalidad sensibilizar a los visitantes de la importancia de tratar las aguas residuales, de no contaminar los ríos y otras aguas superficiales (lagos, lagunas, arroyos, etc.) y de ver la operación de un sistema ecológicamente sustentado.

ANEXOS

A.1. TÉCNICAS EMPLEADAS

A.1.1. Determinación de pH

La determinación del pH se realizó utilizando el sensor para pH del equipo Corning Modelo Check-Mate II de campo de lujo modelo 475631.

El procedimiento que se siguió para efectuar la lectura del pH se describe a continuación:

- a. Instalar el sensor
- b. Fijar las puntas del conector en el medidor y empujar firmemente en el medidor. El medidor se remueve sosteniéndolo firmemente de la parte trasera y jalando el sensor hacia abajo.
- c. Insertar el sensor de pH en el medidor
- d. Quitar la capucha humedecedora del sensor
- e. Enjuagar el sensor con agua destilada, secar con un trapo suave y seco
- f. Sumergir el sensor en la solución buffer de pH = 7
- g. Presionar el botón MODE, READ, CAL o M para encender el medidor y presionar el botón CAL para calibrar el sensor
- h. Una vez que se calibró el sensor
- i. Repetir el paso e.
- j. Sumergir el sensor en la muestra homogénea de agua a medir
- k. Agitar la muestra a una velocidad constante cuando se hagan mediciones
- l. La detección del punto final “congelará” el valor en pantalla cuando esté estable
- m. Anotar la lectura de pH
- n. Si se requiere hacer otra medición repetir los pasos desde el inciso i hasta el inciso m, una vez que hayan terminado las lecturas no debe olvidarse apagar el medidor oprimiendo dos veces la tecla MODE.

A.1.2. Determinación de temperatura

La determinación de la temperatura se realizó utilizando el equipo Corning Modelo Check-Mate II de campo de lujo modelo 475631, y el procedimiento que se siguió fue el mismo que el utilizado para la determinación de pH ya que al realizar la medición de pH el medidor también mostraba la temperatura a la cual se realizó la medición.

A.1.3. Determinación del contenido de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno, DQO

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

I. Reactivos

Solución de digestión

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

Solución H_2SO_4 concentrada

Ag_2SO_4	3.12 g
	En 1 L de H_2SO_4

II. Equipo y material

- Horno Gravity Convection Oven modelo 16 EG
- Centrífuga Internacional Centrifuge
- Espectrofotómetro Spectronic 21 D
- Tubos de vidrio con rosca
- Tubos para centrífuga
- Pipeta volumétrica 2 mL

- Gradilla
- Propipeta

III. Procedimiento

- a. Colocar 2 mL de muestra perfectamente mezclada
- b. Blanco con 2 mL de agua destilada
- c. Agregar 1 mL de solución digestora ($K_2Cr_2O_7$, $HgSO_4$, H_2SO_4)
- d. Agregar 3 mL de solución de H_2SO_4 concentrado/ Ag_2SO_4
- e. Agitar
- f. Digestión por 30 minutos a reflujo cerrado a 165 ° C
- g. Enfriar
- h. Centrifugar 30 minutos
- i. Determinación espectrofotométrica a 600 nm
- j. Calcular la concentración de acuerdo a la curva de calibración

A.1.4. Determinación del contenido de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno, DBO₅

El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

I. Reactivos

- a. Disolución amortiguadora de fosfato: Pesar aproximadamente 8,5 g de fosfato monobásico de potasio, 21,75 g de fosfato dibásico de potasio, 33,4 g de fosfato dibásico de sodio heptahidratado y 1,7 g de cloruro de amonio, disolver en 500 mL de agua y aforar a 1 L. El pH de la disolución debe ser de 7,2. Desechar el reactivo si hay algún signo de crecimiento biológico en el frasco de almacenamiento.

- b. Disolución de sulfato de magnesio: Pesar aproximadamente 22,5 g de sulfato de magnesio heptahidratado, disolver en agua y diluir a 1 L.
- c. Disolución de cloruro de calcio: Pesar aproximadamente 27,5 g de cloruro de calcio anhidro, disolver en agua y diluir a 1 L.
- d. Disolución de cloruro férrico: Pesar aproximadamente 0,25 g de cloruro férrico hexahidratado, disolver en agua y diluir a 1L.

II. Equipo y material

- Incubadora orbital SEV
- Equipo de aireación
- Botellas de vidrio tipo Winkler 300 mL de capacidad

III. Procedimiento

- *Preparación del agua de dilución:* Colocar el volumen requerido de agua en un frasco y añadir por cada litro de agua 1 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos. Antes de usar el agua de dilución debe ponerse a una temperatura aproximada de 20°C. Saturar con oxígeno aireando con aire filtrado, libre de materia orgánica durante 1 h por lo menos.
- *Técnica de dilución:* Hacer varias diluciones por duplicado de la muestra preparada para obtener una captación de OD en dicho intervalo. La experimentación con una muestra concreta permite el uso de un número menor de diluciones. Un análisis más rápido tal como la DQO, presenta una correlación aproximada con la DBO5 y sirve como una guía para seleccionar las diluciones. En ausencia de datos previos, utilizar las siguientes diluciones: de 0 % a 1 % para los residuos industriales fuertes, de 1 % a 5 % para las aguas residuales sedimentadas y crudas, del 5 % al 25 % para el efluente tratado biológicamente y

del 25 % al 100 % para las aguas superficiales contaminadas.

Diluciones preparadas directamente en frascos tipo

Winkler: Utilizando una pipeta volumétrica, añadir el volumen de muestra deseado a frascos Winkler individuales de 300 mL. Llenar los frascos con suficiente agua de dilución, sembrada si es necesario, de forma que la inserción del tapón desplace todo el aire, sin dejar burbujas. Ajustar herméticamente el tapón, poner un sello hidráulico y la contratapa e incubar durante 5 días a 25 °C.

- *Incubación:* Incubar a 25°C ± 1°C las botellas de DBO₅ que contengan las muestras con las diluciones deseadas durante 5 días.
- *Determinación de oxígeno inicial y final:* La determinación del oxígeno disuelto inicial se realizará utilizando el método yodométrico y después de 5 días de incubación se determina el oxígeno disuelto en las diluciones de la muestra y el blanco de la misma forma. La medición del OD debe ser realizada inmediatamente después de destapar la botella de Winkler, para evitar la absorción de oxígeno del aire por la muestra.
- La DBO₅ se va a calcular de la siguiente manera:

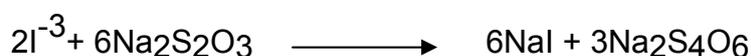
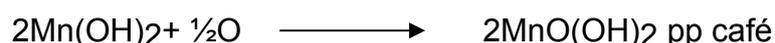
$$DBO_5(mg/L) = \frac{OD_i(mg/L) - OD_5(mg/L)}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

A.1.5. Determinación de oxígeno disuelto

La determinación de oxígeno disuelto se basa en una secuencia de reacciones de óxido-reducción. En la reacción el primer compuesto formado es el hidróxido manganeso el cual se oxida cuantitativamente por el oxígeno disuelto presente en la disolución. El manganeso oxidado se redisuelve en solución ácida y éste es capaz de oxidar a su vez al sistema yodo-yoduro a triyoduro. El triyoduro liberado es equivalente al oxígeno presente en la

muestra y se titula con tiosulfato de sodio usando una solución de almidón como indicador.

Reacciones:



Método Winkler o método yodométrico

Se basa en las propiedades oxidantes del oxígeno disuelto.

I. Reactivos

- a. Solución de sulfato manganoso: Disolver 365 g de sulfato manganoso monohidratado ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en 300 mL de agua destilada, y llevar a un volumen final de un litro. Guardar la solución en frasco ámbar.
- b. Solución de yoduro alcalino: Disolver 500 g de hidróxido de sodio (NaOH) en 500 mL de agua destilada. Disolver 300 g de yoduro de potasio (KI) en 450 mL de agua destilada y mezclar las dos soluciones, aforar a un litro. Guardar la solución en frasco ámbar.
- c. Ácido sulfúrico concentrado R.A. [36 N]
- d. Solución de tiosulfato de sodio [0.01 N] : Disolver 2.9 g de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) llevar 1 litro y Guardar la solución en un frasco ámbar a una temperatura menor de 25°C y estandarizar.

- e. Solución de yodato de potasio [0.01 N] : Secar el yodato de potasio (KIO_3) (Para valorar la solución de tiosulfato de sodio) a 105°C por una hora. Enfriar en el desecador y pesar 0.3567g de yodato de potasio disolver en agua destilada y aforar a 1 litro.
- f. Disolución indicadora de almidón. Disolver en 1 L de agua destilada caliente, 2 g de almidón soluble y 0.2 g de ácido salicílico. Se pueden agregar unas gotas de tolueno como conservador. Mantener en refrigeración siempre que no esté en uso.

II. Equipo y material

- Agitador magnético
- Frascos de vidrio tipo Winkler con tapón esmerilado
- Pipeta automática de 0.5 mL – 5 mL
- Bureta 50 mL
- Matraces Erlenmeyer 125 mL
- Barras magnéticas

III. Procedimiento

A. Valoración del tiosulfato de sodio

- Medir por triplicado 25 mL de agua desionizada en matraces erlenmeyer
- A cada uno de dichos matraces se le agregan: 1 mL de sulfato manganoso, 1 mL de yoduro alcalino, 1 mL de ácido sulfúrico, 10 mL de yodato de potasio y mezclar.
- Titular con tiosulfato de sodio y usar almidón como indicador.
- Se prepara un blanco de reactivos el cual se prepara del mismo modo, a este blanco no se le agrega yodato de potasio.

- Titular con tiosulfato de sodio y usar almidón como indicador.
- Una vez que se cuenta con los resultados se obtiene la concentración real del tiosulfato de sodio.

$$N_{Na_2S_2O_3} = \frac{N_{KIO_3} * V_{KIO_3}}{M}$$

donde M es el promedio del volumen de tiosulfato de sodio necesario para titular la muestra por triplicado menos el volumen de tiosulfato de sodio necesario para titular el blanco de reactivos.

B. Desarrollo de la prueba de oxígeno disuelto

- En el mismo frasco de Winkler donde se diluyó la muestra:
- Agregar 1 mL de sulfato manganoso y 1 mL de álcali-yoduro; ambas adiciones se hacen por debajo de la superficie del líquido.
- Se coloca el tapón con cuidado para evitar burbujas dentro del frasco, se agita por inversión varias veces el frasco, se deja que se sedimente el precipitado hasta aproximadamente dos tercios de la altura del frasco.
- Se destapa cuidadosamente el frasco y se agrega enseguida 1 mL de ácido sulfúrico concentrado, se deja que escurra por el cuello del frasco; se tapa nuevamente y se agita hasta que la disolución sea completa. Hasta ese momento se considera que el oxígeno disuelto se ha fijado.
- Se toman 50 mL como alícuota y se valoran con tiosulfato de sodio, 0.01 N hasta un color amarillo paja.
- Se adicionan unas gotas del indicador de almidón (coloración azul) y se continúa la valoración hasta la primera desaparición del color azul.
- Con los mililitros obtenidos de la titulación se puede conocer la concentración de oxígeno disuelto presente a través de la siguiente ecuación:

$$mgOD = \frac{V_{Na_2S_2O_3} * N_{Na_2S_2O_3} * 8000}{V_{titulado}}$$

A.1.6. Preparación de la curva de calibración para la demanda química de oxígeno, DQO

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

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

La **Tabla A.1.6.1.** presenta los mL de solución estándar madre utilizados para la elaboración de las soluciones estándar, requeridas para la preparación de la curva de calibración, así como también los mL de agua destilada utilizados para llevar a un volumen de 25 mL todas las muestras preparadas.

Tabla A.1.6.1. Cantidades de solución estándar madre y agua destilada utilizadas para la elaboración de la curva de calibración

No. de estándar	Concentración teórica [mg O_2/L]	$C_8H_5KO_4$ [mL]	Agua destilada [mL]
1	0	0.00	25.0
2	50	1.56	23.44
3	80	2.5	22.5
4	100	3.125	21.875
5	200	6.25	18.75
6	300	9.375	15.625
7	400	12.5	12.5
8	500	15.625	9.375
9	600	18.75	6.25
10	800	25.0	0.00

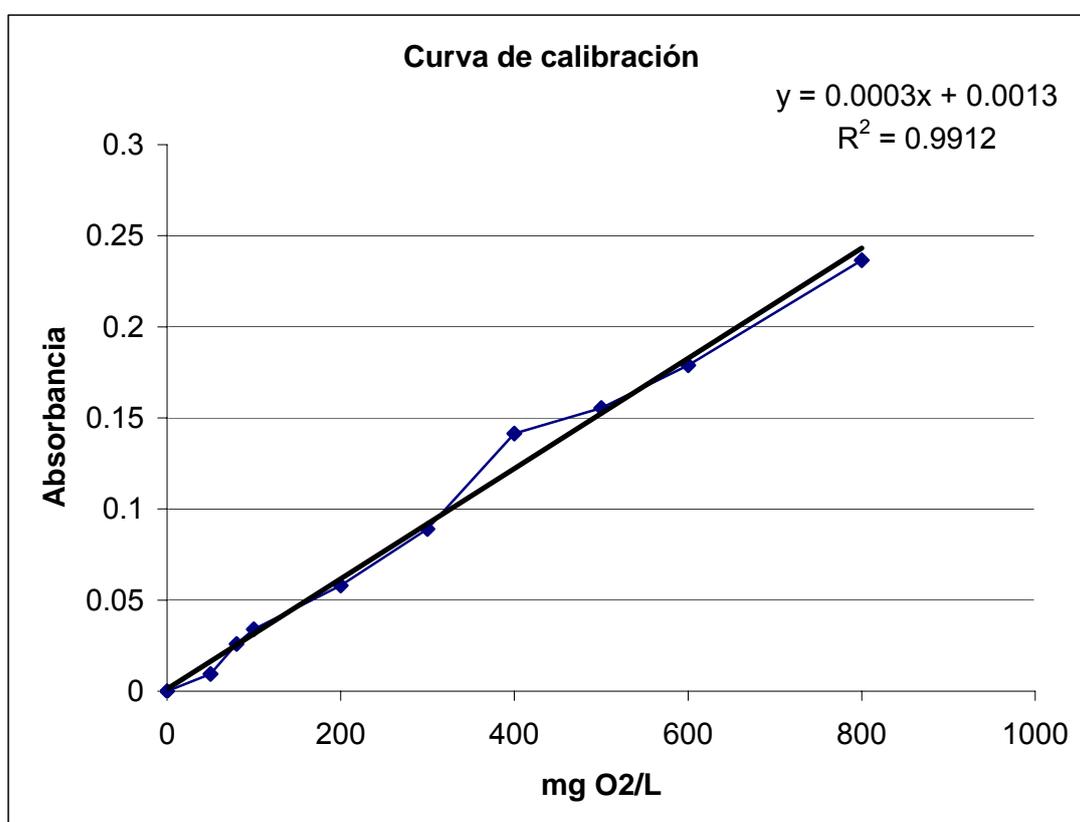
Estas soluciones estándar se someten a digestión, a las condiciones establecidas en el **Anexo A.1.3.**, referente a la elaboración de la técnica de DQO.

Concluido el proceso de digestión de las soluciones estándar, se deja enfriar y posteriormente se efectúan lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro UV-Visible, a una longitud de onda de 600 nm.

Los datos obtenidos en la realización de la curva de calibración son tabulados y graficados, a su vez se obtiene una ecuación de tendencia que proporciona, mediante un cálculo la concentración de DQO (**Ver Anexo A.1.7**).

A.1.7. Curva de calibración utilizada durante el periodo experimental

Durante el periodo experimental se elaboró únicamente una curva de calibración, con ella y su respectiva ecuación se calculó la DQO, para todas las muestras del humedal.



A.1.8. Datos experimentales obtenidos para el HAFH

A.1.8.1. Valor de pH

Fecha	Entradas	Salidas
20/04/2006	7.29	6.84
26/04/2006	7.17	7.05
27/04/2006	7.43	6.98
28/04/2006	7.39	6.82
02/05/2006	7.13	6.69
04/05/2006	7.13	6.71
08/05/2006	7.31	6.61
09/05/2006	7.27	6.55
11/05/2006	7.21	6.46
16/05/2006	7.18	6.43
18/05/2006	7.09	6.43
22/05/2006	7.16	6.59
25/05/2006	7.08	6.89
29/05/2006	6.97	6.34
30/05/2006	7.06	6.31
01/06/2006	7.23	6.4
05/06/2006	7	6.38
06/06/2006	6.94	6.39
08/06/2006	7.02	6.32
12/06/2006	7.05	6.37
15/06/2006	7.05	6.61
19/06/2006	7.15	6.57
20/06/2006	7.16	6.56
22/06/2006	7.05	6.29
Promedio	7.14	6.56

A.1.8.2. Temperatura (°C)

Fecha	Entradas	Salidas
20/04/2006	23.8	22.4
26/04/2006	14.1*	14.9*
27/04/2006	22.2	22.8
28/04/2006	22.2	22.7
02/05/2006	20.5	20.2
04/05/2006	20.3	20
08/05/2006	21.9	21.6
09/05/2006	21.3	20.7
11/05/2006	21	20.5
16/05/2006	20.5	20.1
18/05/2006	19.5	19.2
22/05/2006	20.8	20.4
25/05/2006	21.2	21.5
29/05/2006	22	21.3
30/05/2006	21	20.3
01/06/2006	19.9	19.8
05/06/2006	18.7	19.1
06/06/2006	19.1	19
08/06/2006	20	20
12/06/2006	21.1	20.4
15/06/2006	20.4	20
19/06/2006	20.2	20.1
20/06/2006	20.2	19.7
22/06/2006	20	19.8
Promedio	20.4	20.2

*Almacenadas en el cuarto frío

A.1.8.3. Demanda química de oxígeno, DQO (mg O₂/L)

Fecha	Entradas	Salidas
20-Abr-06	240.66	117.33
26-Abr-06	241	75.66
27-Abr-06	172.33	69
28-Abr-06	177.66	93.33
2-May-06	153.33	110
4-May-06	182.33	137.33
8-May-06	134.33	87.33
9-May-06	132.33	54.33
11-May-06	141	93.33
16-May-06	75.66	15.66
18-May-06	159	74.33
22-May-06	85.66	7.33
25-May-06	195.66	95.66
29-May-06	115.66	85.66
30-May-06	104	74
1-Jun-06	10.66	72.33
5-Jun-06	56.66	55.66
6-Jun-06	90	92.33
8-Jun-06	7.33	22.33
12-Jun-06	67.66	49
15-Jun-06	85.66	95.66
19-Jun-06	66.66	29
20-Jun-06	79	65.66
22-Jun-06	85.6	72.33
Promedio	119.16	72.66

A.1.9. Tratamiento de residuos generados por la técnica analítica para la demanda química de oxígeno

Reactivos necesarios

Ácido clorhídrico 2 N

Hidróxido de sodio 8 N (grado industrial)

Sulfato ferroso amoniacal (grado industrial)

Ácido sulfúrico concentrado

Material necesario

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

Preparación de los reactivos

Ácido clorhídrico 2 N

1. En un matraz aforado de 1 L se pone agua destilada hasta arriba de la mitad.

2. Se le agrega 16.6 mL de ácido clorhídrico concentrado, lentamente por las paredes del matraz (bajo la campana)
3. Se lleva hasta la marca del aforo con agua destilada

Hidróxido de sodio 8 N

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

NOTA: Tener cuidado debido a que la reacción es muy exotérmica

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

Metodología para el tratamiento

1. Utilizar bata de algodón, guantes de látex y lentes de protección
2. Colocar 1 L de residuo en un vaso de precipitado de plástico de 4 L
3. Agregar 20 mL de ácido clorhídrico 2 N (bajo la campana)
4. Agitar durante 1 minuto por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
5. Centrifugar el residuo a 3500 rpm, -10 °C, durante 5 minutos
6. La fase líquida se coloca en un vaso de precipitado de plástico de 4 L
7. La fase sólida es colocada en un envase de plástico exclusivo para esto
8. A la fase líquida obtenida en el paso 6 se le agregan 20 g de sulfato ferroso amoniacal (FAS) grado industrial y se agita durante 5 minutos por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
9. Agregar hidróxido de sodio 8 N, hasta un pH = 9.5 (bajo la campana)

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

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

A.2. Acervo fotográfico



Fotografía 1. Entrada al humedal artificial prototipo del PIQAYQA-FQ-UNAM ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán



Fotografía 2. Estado del humedal artificial prototipo al inicio de la investigación



Fotografía 3. Estado del río Magdalena al inicio de la experimentación



Fotografía 4. Estado del humedal prototipo al final de la investigación



Fotografía 5. Otra vista del estado del humedal prototipo al final de la investigación



Fotografía 6. Salida del agua tratada de la cisterna a los canales de riego del Vivero Forestal de Coyoacán



Fotografía 7. Instalación de un “dique” de costales para ayudar a subir el nivel del río Magdalena al final de la investigación



Fotografía 8. Otra vista del “dique” de costales para ayudar a subir el nivel del río Magdalena al final de la investigación

BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo. 2006. Consulta a redes internacionales. Dirección electrónica: <http://contaminacion-purificacion-agua.blogspot.com/>
- APHA-AWWA-WPCF. 1989. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Díaz de Santos, editores. México D.F.
- Brix, H. 1993a. Water treatment in constructed wetlands: system design, removal processes and treatment performance. En *Constructed wetlands for water quality improvement*. Ed. G. A. Moshiri, Ph. D. Editorial Lewis Publishers. Pp. 9-19. Boca Raton, FL. EEUA.
- Brix, H. 1993b. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: Transport mechanisms and rates. En *Constructed wetlands for water quality improvement*. Ed. G. A. Moshiri, Ph. D. Editorial Lewis Publishers. Pp. 391-398. Boca Raton, EEUA.
- Brix, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Wat. Sci. Technol.*, 35 (5): 11-17.
- Davis, M. L. y Cornwell, D. A. 1991. *Introduction to environmental engineering*. 2a. edición. Mc Graw- Hill. EEUA.
- DOF. 2000a. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DEL pH - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-008-1980). Poder Ejecutivo Federal. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. México.
- DOF. 2000b. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-007-1980). Poder Ejecutivo Federal. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. México.
- DOF. 2001a. Norma Mexicana NMX-AA-012-SCFI-2000. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-012-1980). Poder Ejecutivo Federal. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. México.
- DOF. 2001b. Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2000. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO₅) Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-028-1981). Poder Ejecutivo Federal. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. México.

- Durán-de-Bazúa, C. 1994. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria de proceso. Pub. Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM. México D.F., México.
- Durán-de-Bazúa, C., Haberl, R., Kreiner, I., Krishnan-Ranjani, Luna-Pabello, V. M. (Profesores); Fenoglio-Limón, F. E., Kneidinger, Ch., Millán-Hernández, S.E., Miranda-Ríos, M., Ramírez-Carrillo, H.F., Salinas-Castillo, N.V., Sánchez-García, H., Schaller, P., Soto-Esquivel, M.G. (Estudiantes). 2000. Artificial wetlands: viable options for rural, suburban, and urban areas in Mexico City. En 7th International conference on wetland systems for water pollution control. Volumen 2. University of Florida, International Water Association. Florida, EEUUA.
- Durán-de-Bazúa, C., Haberl, R., Kreiner, I., Krishnan-Ranjani, Luna-Pabello, V. M., Ramírez-Burgos, L.I. (Profesores); Fenoglio-Limón, F. E., García-Vázquez, L., Guzmán-Aguirre, S., Juárez, C.H., Kneidinger, Ch., Millán-Hernández, S.E., Miranda-Ríos, M., Ramírez-Carrillo, H.F., Rodríguez-Cruz, A., Rodríguez-Monroy, J., Salinas-Castillo, N.V., Sánchez-García, H., Schaller, P., Soto-Esquivel, M.G., Varela-Montellano, E. (Estudiantes). 2006. Humedales artificiales en México: Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales. **Vol. 6, Serie: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA**. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y Quim. Amb. ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 185 pags. 200 ejemplares, 1a. Ed. (1999), 194 pags. 200 ejemplares, 2a. Ed. (2001), 205 pags. 100 ejemplares, 3a. Ed. En prensa.
- Durán-de-Bazúa, C., Rodríguez-Cruz, A., Varela-Montellano, E. 2003. Manual de construcción, arranque y operación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de casas habitación en zonas rurales o suburbanas y para el tratamiento terciario de aguas residuales de casas habitación o de condominios verticales suburbanos. **Vol. 6 bis, Serie: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA**. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y Quim. Amb. . ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 27 pags. 100 ejemplares, 1a. Ed. 27 pags. 500 ejemplares, 2a. Ed. En prensa.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Luna-Pabello, V.M. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. Solicitud de Registro: Diciembre 15, 1998. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes. México. Patente Núm. 210924. Otorgada el 21 de octubre de 2002.
- Gaitán-Zamora, N.A. 2006. Evaluación ecotoxicológica de 'composta' producida con residuos vegetales de humedales artificiales y lodos primarios a escala laboratorio. Tesis de maestría en ingeniería ambiental. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. México, D.F. México.
- Guido-Zárate, A. 2006a. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de maestría en

ingeniería ambiental. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. México, D.F. México.

Guido-Zárate, A. 2006b. Scientific basis for wastewater treatment using constructed wetlands. Comunicación personal. México, D.F. México.

IWA. 2000. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design, and operation. Londres, Reino Unido.

Kadlec, R.H., Knight, R.L. 1996. Treatment Wetlands. CRC. EEUA

Kneidinger, Ch. 1996. Proyecto sobre establecimiento de las metodologías para la medición de la eficiencia de depuración de humedales construidos o artificiales (Uso de carrizos y otras macrofitas en la depuración terciaria de aguas residuales agroindustriales). Universidad BOKU de Viena. Diplom Arbeit. Octubre 1995-marzo 1996. Viena, Austria.

Lara-Borrero, J.A. 2006. Consulta a redes internacionales. Dirección electrónica: <http://www.goecities.com/jalarab>

Metcalf y Eddy, Inc. 1991. Wastewater Engineering. Treatment, disposal and reuse. 3ª. Edición. McGraw Hill. Nueva York, EEUA.

Millán-Licona, R. Consulta a redes internacionales. Dirección electrónica: http://mx.goecities.com/r_millan_l/art03.html

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

Reddy, K.R., D'Angelo, E.M. 1997. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. *Wat. Sci. Technol.*, 35(5): 1-10.

Rodríguez, A., Varela, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional. Ingeniería Química. FES Zaragoza, UNAM. México D.F. México.

Romero-Rojas, J. A. 1999. Calidad del agua. 2ª. Ed., Alfaomega. México, D.F. México.

Schaller, P. 1998. Proyecto sobre establecimiento de las metodologías para la medición de la eficiencia de depuración de humedales construidos o artificiales (Uso de carrizos y otras macrofitas en la depuración terciaria de aguas residuales agroindustriales). Universidad BOKU de Viena. Diplom Arbeit. Octubre 1997-marzo 1998. Viena, Austria.

SEMARNAT. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.

SEMARNAT. 2006. Consulta a redes internacionales. Dirección electrónica: <http://www.semarnat.gob.mx>

Tchobanoglous, G. (1996). Land-based systems, constructed wetlands and aquatic plant systems in the United States: An overview. Ecological Engineering for Wastewater Treatment. 2a. Ed. Lewis Publishers. Nueva York, EEUUA.