



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**OPERACIÓN DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL A BASE DE
HUMEDALES ARTIFICIALES PARA TRATAR AGUA PROCEDENTE
DEL CANAL DE CUEMANCO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

HUGO SÁNCHEZ GARCÍA

Director de tesis: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello



México, D.F

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

<i>PRESIDENTE PROF.</i>	<i>LETICIA MA. DE LOS ANGELES GONZÁLES ARREDONDO</i>
<i>VOCAL PROF.</i>	<i>RODOLFO TORRES BARRERA</i>
<i>SECRETARIO PROF.</i>	<i>VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO</i>
<i>1ER. SUPLENTE PROF.</i>	<i>HILDA ELIZABETH CALDERÓN VILLAGOMEZ</i>
<i>2DO. SUPLENTE PROF.</i>	<i>JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO</i>

Sítio donde se desarrollo el tema:

Esta tesis de licenciatura se realizó en el Laboratorio de Microbiología Experimental, en el Departamento de Biología de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México

Asesor del tema:

Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

Sustentante:

Hugo Sánchez García

RECONOCIMIENTOS

El trabajo de investigación de la presente tesis, fue realizado en las instalaciones del laboratorio de microbiología experimental de la facultad de Química, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se reconoce el apoyo recibido por el PAPIT IN 107209-3 “Desarrollo de un humedal artificial de alta eficiencia para la remoción de contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos” al PAIP 6190-14 (VMLP 2008-2009) para la obtención de los materiales y reactivos empleados en la fase de experimentación y proyecto realizado en el marco del convenio de colaboración académica y de investigación núm. 18029-314-13-iii-06, “estudios integrales e interdisciplinarios relacionados con la sustentabilidad, la conservación ecológica y de la biodiversidad de la zona lacustre de

Agradecimientos

De antemano agradezco el gran apoyo, dedicación, conocimientos, paciencia y amistad al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por brindarme los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

A Lourdes Patricia Castro (Patri), por sus consejos, observaciones y apoyo en el proceso de la elaboración de este trabajo de tesis y sobre todo por su valiosa amistad.

A la profesora Lupita y al profesor Luciano por sus consejos y comentarios que apoyaron este trabajo.

A mis sinodales, la Q. Leticia Ma. de los Ángeles González Arredondo, al Ing. Rodolfo Torres Barrera, a la QFB. Hilda Elizabeth Calderón Villagomez, y al Dr. José Agustín García Reynoso.

A la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México por haber permitido formarme en sus instalaciones y ser parte de sus alumnos.

Al Biol. Sergio Aburto Castañeda, Ing. Fernando Gómez Martínez, al Ing. y Biol. Rafael Magaña López, a mi asesor el M. en I. A Héctor Faustino Ramírez Carrillo, y al Ing. Benjamín Segura Miranda. A ellos les agradezco todo el apoyo, conocimientos, ayuda y amistad durante la elaboración de este trabajo. A todos y cada uno de mis compañeros del Laboratorio de Microbiología Experimental de la Facultad de Química de la UNAM por permitirme compartir el tiempo con ellos.

***Pude ver más allá que todos ustedes,
porque estoy en hombros de gigantes.***

Isaac Newton (1642-1727) Matemático y físico británico.

(A mi Familia)

Dedicatorias

En principio, quiero agradecer académicamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la educación y los conocimientos adquiridos durante el periodo de mi carrera como Ingeniero Químico. A la facultad de Química por proporcionar sus instalaciones y zonas de esparcimiento.

Agradezco indudablemente a mi familia, pero resaltando y comenzando por mi madre, la Sra. Angelina García Rosalino. Ella que día a día se esforzó por que cumpliera esta meta en base a su cariño y su amor. Por toda la buena vida que me has dado, comenzando por ser mí madre.

A mis hermanos: Hilda, Ma. del Rosario, Sergio, Arturo, Ma. de Jesús, Daniel y Ma. Luisa por la vida que me han dado, por los buenos y malos momentos. Por los consejos y enseñanzas. Por lo bueno y por lo mejor que me han dado toda la vida. Por el tiempo dedicado. Por ser parte fundamental en mí. Por todas esas cosas que me sirvieron y aprendí de todos y cada uno de ustedes y mejor aún, por todo eso que falta por vivir con ustedes.

A mis sobrinos: Gustavo, Adriana y David, Laura, Arturo, Frida, Igor, Dánae, Bruno, Camila y René. Porque los pequeños sean mejores todos.

A mis cuñados: Jorge Adrian A. R que a lo largo de mi vida me has enseñado a ser mejor persona con tus acciones, Janet A. N desde siempre y Laura B. L. por estar de nuevo.

A todos y cada uno de mis amigos y colegas de la carrera. A aquellos que en algún momento formaron parte importantísima en mi vida y que por alguna razón y debido a las circunstancias, se ha impedido que estemos juntos como antes.

A todos esos amigos y personas que seguramente son muchos, y no menciono, pero que están indudablemente involucrados en mi vida. Sin dejar atrás, también, agradezco y dedico este trabajo a todas esas personas que pensaban que no terminaría esta carrera, porque gracias a ellas me empeñe más para llegar a esta meta.

Por último, también dedico este trabajo a la persona que en este momento comparte su vida conmigo. Porque ella sea lo que siempre he estado esperando.

RESUMEN	5
1 INTRODUCCIÓN	8
2 OBJETIVOS, ALCANCES Y ESTRATEGIA DE TRABAJO	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos particulares	11
2.3 Alcances	11
2.4 Estrategia de trabajo	12
3 MARCO TEÓRICO	15
3.1 Problemática del agua en el Lago de Xochimilco	15
3.2 Alternativas de tratamiento de agua	16
3.3 Clasificación de los HA	18
3.4 Principales constituyentes de los HA	20
3.5 Ventajas y desventajas de los HA	20
3.6 Procesos depurativos en los HA	21
3.6.1 Procesos físicos	22
3.6.2 Procesos químicos	22
3.6.3 Procesos biológicos	24
4 INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL ...	26
4.1 Aspectos generales	26
4.1.1 Localización del sistema experimental	26
4.1.2 Condiciones climatológicas de la ZMCM	28
4.1.3 Características del agua en el Canal de Cuemanco	29
4.2 Descripción del sistema experimental	29
4.2.1 Sedimentador primario	30
4.2.2 Humedal artificial de flujo combinado	30
4.2.3 Tanque de almacenamiento	31
4.2.4 Filtro de pulimento FP	31
4.3 Componentes del HAFC y forma de alimentación	32
4.3.1 Material de empaque	33
4.3.2 Plantas vasculares de uso común en HAFC	35
4.3.3 Microorganismos participantes en la depuración	37
4.3.4 Formas de alimentación de HAFC	38
4.4 Actividades de construcción del HAFC	39
4.4.1 Excavación	40
4.4.2 Sistema de drenado	40
4.4.3 Relleno del lecho filtrante del HAFC	43
4.4.4 Sistema de distribución hidráulica del HAFC	43

4.4.5	Filtro de pulimento.....	46
4.4.6	Colocación de plantas vasculares en el HAFC	46
4.4.7	Diagramas del sistema experimental construido	47
4.4.8	Descripción del proceso del HAFC	47
5	ETAPA DE ARRANQUE DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	50
5.1	Pruebas operativas.....	50
5.1.1	Pruebas en bombas	51
5.1.2	Pruebas en líneas de distribución	52
5.1.3	Pruebas en líneas de captación	52
5.2	Análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos	52
5.2.1	Oxígeno disuelto	53
5.2.2	Demanda química de oxígeno	54
5.2.3	Ortofosfatos.....	54
5.2.4	Nitratos.....	54
5.2.5	Nitritos	55
5.2.6	Nitrógeno amoniacal	55
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
6.1	Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos.....	57
6.2	Resultados operativos.....	59
6.3	Resultados de parámetros fisicoquímicos	61
6.4	Resultados de parámetros biológicos.....	64
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
	ANEXO.....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	86

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de actividades.....	13
Figura 2. Clasificación de los humedales artificiales.	19
Figura 3. Ubicación del sistema experimental.	28
Figura 4. Diagrama de bloques del humedal artificial de flujo combinado.....	29
Figura 5. Perfil granulométrico del material de empaque.	34
Figura 6. Arreglo hidráulico de apertura y cierre de válvulas.....	39
Figura 7. Tubería de drenado vertical del agua residual a tratar.	41
Figura 8. Tubería de drenado horizontal del agua residual a tratar.	42
Figura 9. Tubería de aireación y muestreo del agua residual a tratar.	43
Figura 10. Arreglo de válvulas del agua residual a tratar en el HAFC.	44
Figura 11. Líneas de distribución del agua residual a tratar en el HAFC.....	45
Figura 12. Distribución del agua a tratar por microaspersión.	45
Figura 13. Filtro de pulimento.....	46
Figura 14. Vista aérea del humedal artificial de flujo combinado.....	83
Figura 15. Vista frontal del humedal artificial de flujo combinado.....	84

Índice de tablas

Tabla 1. Volumen de material de soporte y tamaño de partícula requeridos.....	34
Tabla 2. Especies vegetales de uso frecuente en humedales artificiales.....	36
Tabla 3. Resultados de SST, SDT y Sse.....	61
Tabla 4. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de SST.	75
Tabla 5. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de SDT.	75
Tabla 6. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de temperatura (C).....	76
Tabla 7. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de conductividad eléctrica (μs).....	76
Tabla 8. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de pH (unidades de pH).	77
Tabla 9. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de Sse.	77
Tabla 10. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de OD.	78
Tabla 11. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de la DQO.	78
Tabla 12. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro del (NH_4^+).	79

Tabla 13. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de (NO_2^-).	79
Tabla 14. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de (NO_3^-).	80
Tabla 15. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de (PO_4^{3-}).	80
Tabla 16. Resultados estadísticos.	81

Índice de gráficas

Gráfica 1. Disminución de sólidos suspendidos totales por etapa.	61
Gráfica 2. Disminución de sólidos totales por etapa.	62
Gráfica 3. Sólidos sedimentables por etapa.	62
Gráfica 4. Demanda química de oxígeno.	64
Gráfica 5. Oxígeno disuelto.	65
Gráfica 6. Perfil de nitrificación.	66
Gráfica 7. Porcentajes de remoción en la nitrificación.	68
Gráfica 8. Ortofosfatos.	70
Gráfica 9. Porcentaje de remoción de ortofosfatos.	71

RESUMEN

El Lago de Xochimilco se encuentra al sureste de la Ciudad de México. Es el cuerpo acuático de mayor dimensión en la zona, cuenta con una extensión de 54 hectáreas. En sus inmediaciones, se cultivan diversas especies vegetales tanto para el consumo humano, como de ornato. En términos generales, el agua que contiene es de baja calidad, debido a que recibe como influentes agua residual tratada procedente de la Planta de Cerro de la Estrella, aguas municipales sin tratamiento conformadas por aguas residuales domésticas y las generadas por actividades y de diversos talleres aledaños. En este hábitat lacustre, sobreviven diferentes especies de animales acuáticos, tales como acociles, ranas, ajolotes y charales, entre otros. A su vez, estas aguas son utilizadas para actividades agrícolas y recreativas, con el consecuente riesgo de salud para los consumidores de los productos cosechados y personas que habiten o visiten la región. Lo anterior hace necesaria la búsqueda de alternativas de solución, entre las que se encuentra el uso de ecotecnias efectivas para la depuración de aguas residuales que permitan, por un lado, frenar el deterioro del cuerpo de agua y, por otro, reusar de manera segura el agua tratada en actividades de riego agrícola y permita la protección de la vida silvestre. En este sentido, los humedales artificiales (HA) son una opción interesante de explorar. Un HA basa su funcionamiento en el conjunto de sus constituyentes principales: a) un medio de soporte, b) plantas vasculares y c) la actividad de microorganismos.

En la presente tesis, se evaluó la operación de un sistema experimental a base de humedales artificiales para tratar agua procedente del canal de Cuemanco. El sistema está compuesto por un sedimentador primario en el cual se retiran los sólidos sedimentables. Como segunda etapa, se encuentra el HAFC, conformado por un lecho filtrante estructurado por horizontes de grava con distinta granulometría; plantas vasculares que retiran nutrientes del agua residual, y brindan soporte a las colonias de microorganismos depuradores que aceleran la degradación de la materia orgánica. La tercera etapa consiste en un filtro de pulimento conformado por partículas de material calizo, el cual contribuye una mayor remoción de compuestos nitrogenados y fosforados.

El sistema en su conjunto, permite obtener agua tratada de alta calidad susceptible de ser empleada para cultivo hortícola y de fauna acuática silvestre, incluidas especies endémicas de la zona como es el caso del ajolote. Como subproductos adicionales se obtienen plantas de ornato y de forraje.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Antes de la conquista, en la cuenca del Valle de México existían un gran número de habitantes y centros urbanos bien organizados. Pese a ello, hace 500 años, ésta era una región totalmente distinta, poseedora de abundante vegetación y poblada por gran variedad de especies animales. El diseño de la ciudad con mayor área, Tenochtitlán, estaba basado en un conjunto urbano ambientalmente equilibrado. Cinco lagos la rodeaban: Xaltocan y Zumpango al norte, Texcoco al centro y Xochimilco y Chalco al. Diferentes factores han influido en la transformación del paisaje, pero ninguno tan determinante como la pérdida gradual de estos lagos que alguna vez fueron la principal fuente de alimento, agricultura y medio de transporte en la región. El drenaje paulatino de los lagos permitió a la ciudad expandirse, pero ocasionó una pérdida irreversible de suministros de agua y, en diversas áreas, dejó al descubierto lechos lacustres que resultaron inútiles para cualquier actividad económica, debido a su salinidad natural. Este fenómeno produjo, en diversas áreas pero especialmente en la de Texcoco, zonas desaprovechadas, en las cuales durante décadas se acumuló polvo, lodo y basura, que en los meses secos provocan tolvánicas y en los lluviosos, enormes charcos insalubres. El aumento en las descargas de aguas residuales, ha llevado a que la mayoría de estos cuerpos receptores de agua, así como los mantos freáticos presenten distintos tipos y niveles de contaminación. En el caso de la Ciudad de México, los pocos lagos que sobreviven cuentan con niveles considerables de materia orgánica, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nutrientes y compuestos tóxicos. En el sureste de la Ciudad de México se encuentra el lago de Xochimilco, el cual es el cuerpo acuático de mayor dimensión en la zona y representa uno de los últimos vestigios de la antigua zona lacustre. Actualmente, en las chinampas o islas artificiales de Xochimilco, se cultivan diversas especies de vegetales para el consumo humano y de ornato. El agua empleada es de mala calidad por lo que es necesario recurrir a nuevas y diversas alternativas de prevención de la contaminación. Lo anterior, con el propósito de frenar el curso del deterioro por el cual atraviesa la zona del lago, y ofrecer opciones que mejoren la calidad de agua que existe en los canales antes de que sea usada para el riego de cultivos (Bojórquez y Amaro, 2003; CONAGUA, 2008).

Dentro de las principales metas, se encuentra la experimentación empleando aguas residuales en la zona lacustre de Xochimilco. En este contexto, el sistema propuesto tratará una fracción de las aguas provenientes del Canal de Cuemanco. Se prestará especial cuidado porque dicho sistema, cuente con capacidad de remoción de nutrientes a efecto de poder obtener dos diferentes tipos de agua tratada. El primero procedente del humedal artificial propiamente dicho (agua tipo A, riego hidropónico), y el segundo, derivado del filtro de pulimento (agua tipo B, prevención de la eutroficación y protección de vida silvestre).

CAPÍTULO II. OBJETIVOS, ALCANCES Y ESTRATEGIA DE TRABAJO

2 OBJETIVOS, ALCANCES Y ESTRATEGIA DE TRABAJO

2.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño depurativo de un sistema experimental a base de humedales artificiales alimentado con agua del canal de Cuemanco.

2.2 Objetivos particulares

Conceptualizar un sistema de tratamiento basado en un humedal artificial de flujo combinado con opción a un filtro de pulimento, para reducir el contenido de nitrógeno y fósforo presente en el agua del canal de Cuemanco.

- Realizar el arranque y seguimiento del comportamiento depurador del sistema experimental.

Definir posibles usos del agua tratada por el sistema experimental, considerando la normatividad nacional ambiental vigente aplicable.

2.3 Alcances

La finalidad del presente trabajo, es la conceptualización, arranque y operación de un sistema experimental tipo humedal artificial de flujo combinado (HAFC) con capacidad para depurar entre 2 a 6 metros cúbicos por día de agua proveniente del Canal de Cuemanco. El efluente obtenido deberá ser de calidad apta para riego agrícola restringido y protección de vida silvestre.

Dentro de los principales alcances, destaca la obtención de información práctica que permita enriquecer los criterios operativos relacionados con dichos sistemas, con lo

cual se maximizará el rendimiento del humedal artificial, reduciendo los costos operativos y de mantenimiento.

Dicha información se obtendrá durante el periodo de operación del sistema experimental, tomando en cuenta tres actividades principales. 1) los tiempos de operación del sistema, 2) los intervalos de tiempo en diferentes épocas del año, para darle mantenimiento a los equipos y la colecta de la cosecha de los productos de siembra, así como su poda, y 3) el seguimiento a la caracterización del agua en los distintos puntos del sistema con el fin de llevar un control de la eficiencia del sistema en su conjunto.

Para obtener esta última información, en el sistema se evaluaron los siguientes parámetros: pH, temperatura, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno, ortofosfatos, nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales. El periodo de muestreo fue de mayo del 2007 y hasta mayo de 2008, en diferentes puntos del sistema.

2.4 Estrategia de trabajo

Para llevar a cabo la realización de este proyecto, se plantearon actividades previas las cuales fueron realizadas para este trabajo, destacando que algunas de dichas actividades se encontraban fuera de nuestros alcances como se mostrará en los siguientes capítulos.

En la Figura 1, se engloban las actividades generales del proyecto con el cual se desarrolló el humedal artificial de flujo combinado. En esta misma figura, se señalan en forma sombreada las actividades retomadas para la realización de este trabajo de tesis.

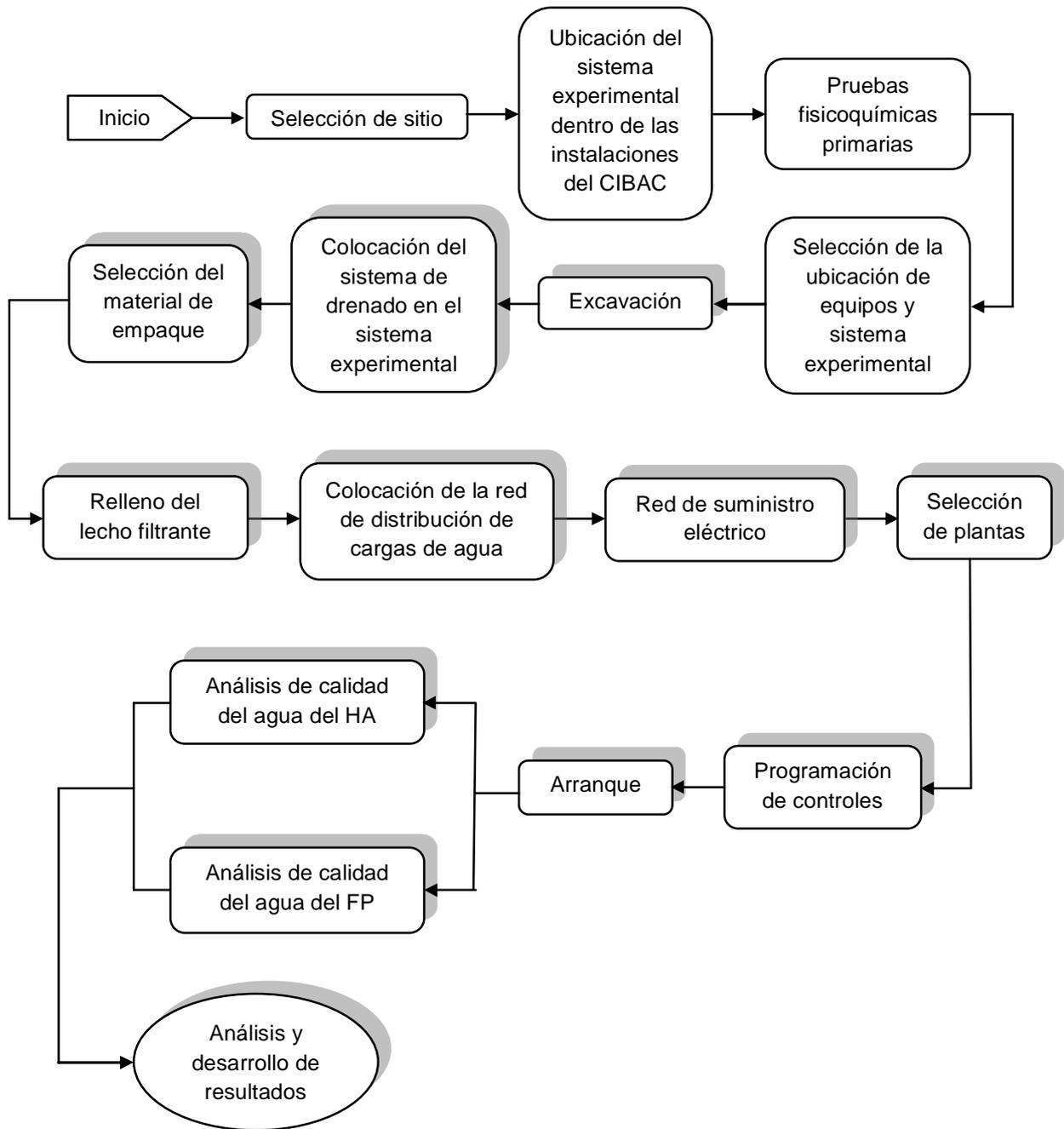


Figura 1. Diagrama de flujo de actividades.

*Las actividades sombreadas en la figura 1, fueron realizadas como parte de la presente tesis.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Problemática del agua en el Lago de Xochimilco

Xochimilco es una de las zonas rurales perimetrales de la ciudad de México que ha sido poblada gradualmente por la mancha urbana y ha servido como la expansión de sus actividades económicas. Así, los pueblos de Xochimilco han sido protagonistas de la expansión urbana incontrolada en el sur de la ciudad de México. Las aportaciones que representan los asentamientos humanos provocados por el proceso de urbanización, han propiciado un cambio en el uso de suelo de la región y limitado la cantidad de agua que antes fluía hacia los manantiales, esto, originando que las áreas de preservación ecológica se encuentren en decremento. El cuerpo de agua se encuentra transformado por las descargas y extracción de agua subterránea mediante pozos. Los aportes que recibe el sistema son provenientes de la PTAR de Cerro de la Estrella, agua sin tratamiento proveniente de los asentamientos humanos irregulares de la zona, escurrimientos de diferentes localidades aledañas al canal y aporte de ríos. En la actualidad, los canales de Xochimilco han sufrido alteraciones provocadas por el crecimiento demográfico, aunado a una incorrecta distribución de la población, ya que coexisten pueblos escasamente poblados a lado de zonas densamente pobladas, donde los servicios sanitarios son insuficientes. El descargar aguas residuales hacia los canales, los asentamientos de comercios irregulares cercanos a los canales y la agricultura ha ocasionado un incremento en la contaminación microbiológica, provocada por los desechos de origen fecal, así como compuestos fosfatados y nitrogenados provenientes de fertilizantes y productos domésticos de limpieza. Esto ha propiciado que los servicios ambientales que prestaba la zona hayan disminuido o desaparecido (Sandoval Contreras, 2008). Aunado a la deficiencia en la calidad del canal provocada por actividades antropogénicas, se suma la presencia del lirio acuático (*Eichornia crassipes*). Esta especie fue estimulada por los cambios de calidad de agua, ya que la sobresaturación de elementos salinos y orgánicos, ocasionó un crecimiento desmedido provocando el azolvamiento de las zonas de almacenamiento y depósitos naturales de agua (Sandoval Contreras, 2008).

3.2 Alternativas de tratamiento de agua

Debido al deterioro ambiental de la zona de Xochimilco, es necesario recurrir a nuevas técnicas que permitan prevenir y controlar su degradación y con esto la mejora de la calidad de vida. Tal opción se presenta en el buen manejo de los cuerpos de agua. Actualmente los sistemas de tratamiento de agua están solo diseñados para la remoción de materia orgánica del tipo carbonoso y la minimización de microorganismos de origen entérico, logrando depositar cantidades altas de nitrógeno y fosforo. La existencia de este tipo de compuestos origina el fenómeno de eutroficación dándose a notar por el enverdecimiento del agua debido a la presencia de microalgas, esto aunado a otros factores más provocan limitaciones para el uso del agua para sus diversos usos.

Existen diversos tipos de tratamientos de las aguas tanto para potabilizarlas como para las residuales. Dado que las exigencias en la calidad del agua se basan en la aplicación para el consumo humano y animal estas dos comparten diferentes y variadas opciones.

Los sistemas de tratamiento más comunes son: los aerobios, anaerobios, biológicos, sedimentación, lodos activados entre otros. Pero todos estos procesos conllevan grandes consecuencias como altos costos en arranque y operación, subproductos que requieren otro tipo de tratamiento, constante mantenimiento, supervisión continua y operadores capacitados para su buen rendimiento (Luna Pabello y Ramírez Carrillo, 2009)

Una de las opciones para la depuración de cuerpos de agua contaminados lo representan los humedales artificiales (HA) esta es una ecotecnología basada en humedales naturales que permite tratar aguas residuales de manera sustentable, los HA poseen ventajas que los hace técnica y económicamente atractivos, estos sistemas brindan ciertos beneficios tales como la obtención de agua tratada con calidad acorde con normatividad nacional e internacional, los costos de diseño, operación y mantenimiento resultan menores que otros sistemas de tratamiento, así como una fácil

disposición en sus subproductos tales como plantas del tipo forrajero y ornato. Los HA se describen típicamente por la posición de la superficie de agua y/o el tipo de vegetación presente. De acuerdo con la EPA (2003), la mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera; estos incluyen a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), las zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y plantas macrofitas emergentes).

Un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio de soporte apropiado como es la grava que es el medio más utilizado en algunos países, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos, malos olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto directo con el agua residual parcialmente tratada. En contraste, la superficie del agua en los pantanales naturales y en los humedales artificiales de flujo libre superficial. Así también, los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a los 60 cm. con plantas emergentes como carrizos y juncos. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas (biopelículas) que facilita la adsorción y filtración de los constituyentes de 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 (Ramírez Carrillo, 1998).

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales, y son las siguientes:

Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.

- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos y Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo costo en el mantenimiento.

Más sin embargo, y pesar de las bondades y ventajas de los HA, su construcción en México aún ha sido insuficiente, ya que actualmente sólo se cuenta con un porcentaje menor al 7% de sistemas instalados de este tipo del total de plantas de tratamiento de aguas residuales que operan en el país (Luna Pabello y Ramírez Carrillo, 2009).

Esencialmente los diversos diseños de los HA están enfocados al tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones. Sin embargo actualmente se está llevando a cabo diversos estudios con el propósito de hallar con este tipo de tratamiento, sistemas que permitan tratar aguas con otros tipos de contaminantes como hidrocarburos, metales pesados o plaguicidas (Luna Pabello y Ramírez Carrillo, 2009).

3.3 Clasificación de los HA

Algunos autores sugieren clasificar a los HA en cuatro tipos diferentes tomando como base la forma de vida de las plantas vasculares del sistema (Figura 2). Existen los sistemas de libre flotación, sistemas de plantas subemergentes, sistemas multietapas y sistemas de plantas con raíces emergentes. Estos últimos se a su vez se dividen en sistemas de flujo superficial y de flujo subsuperficial (Millán Hernández, 1999).

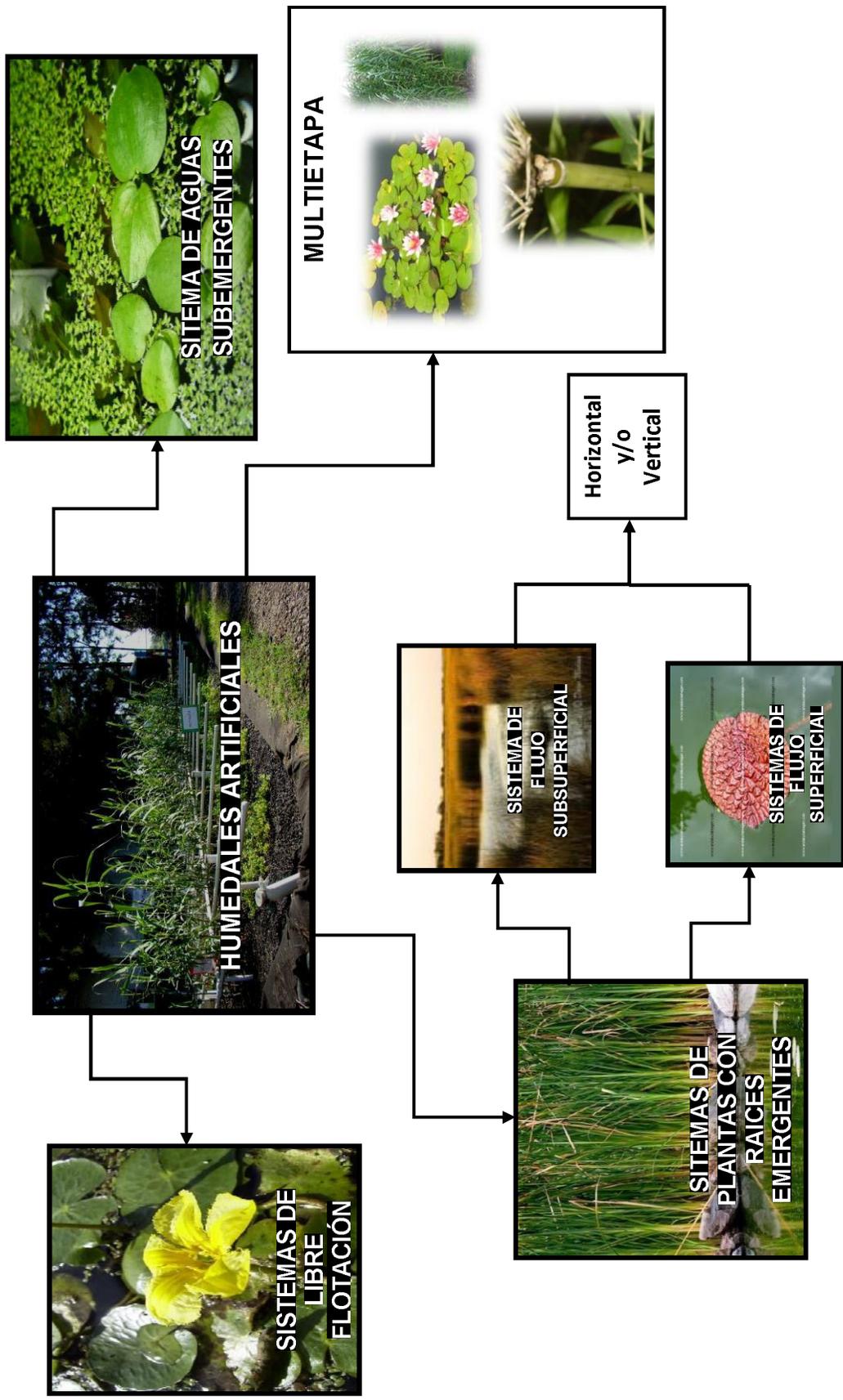


Figura 2. Clasificación de los humedales artificiales.

3.4 Principales constituyentes de los HA

Pese a los diferentes tipos de HA, e independientemente de los requerimientos y de los equipos que lo conformen para su pretratamiento del agua así como su postratamiento, los constituyentes en dichos sistemas se generalizan en los siguientes constituyentes:

- Zona de alimentación del efluente.
Lecho o medio filtrante.
- Plantas vasculares emergentes.
Microorganismos.
- Zona de almacenamiento y desalojo del efluente tratado.

3.5 Ventajas y desventajas de los HA

Ventajas

La reducción de hasta en un 90% de contaminantes disueltos en las aguas residuales domésticas.

- Imagen estética y agradable.
Produce la generación de flora y fauna.
- Evita la propagación de plagas nocivas.
No generan malos olores.
- Genera agua para diversos usos de buena calidad agrícola.
Diseño sencillo.
- Fácil operatividad.
Reducción de mantenimiento.
- El diseño aplica en cualquier tipo de terreno.
El área está en función de la calidad de agua deseada y de las características del influente a tratar.

- Mínimo consumo de energía eléctrica, bajo costo en diseño, construcción operación y mantenimiento.
No se requiere de constante supervisión.
- No consume productos químicos.
Se pueden aprovechar las pendientes del terreno para el proceso (Jiménez Tovar, 1999).

Entre las desventajas que pueden dañar o afectar la eficiencia y buen funcionamiento de los HA se encuentran los errores humanos más que los atribuidos al propio sistema de tratamiento. Sin embargo pueden mencionarse:

- Errores de diseño.
Sequia de plantas en el lecho y posibles incendios.
- Plagas de insectos.
Área requerida por volumen de agua tratada.

3.6 Procesos depurativos en los HA

La estimación en la eficiencia de los HA, se determina, mediante su capacidad para remover los diferentes tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales. Por lo regular, en estos tipos de sistemas la mayor importancia de remoción de contaminantes en el influente y efluente se enfoca en la materia orgánica (DQO), los sólidos sedimentables (Sse), sólidos disueltos (SD), nitrógeno total (NT) y fosforo total (PT).

Los procesos en los que se basa el funcionamiento de los HA son del tipo físico, químico y biológico. La combinación de estos diferentes procesos depurativos para la remoción de contaminantes de manera simultánea y/o secuencial a lo largo del sistema.

3.6.1 Procesos físicos

En el tren de tratamiento se llevan a cabo varios procesos físicos que permiten la retención de diferentes tipos de sólidos que podrían afectar el funcionamiento de los HA. Estos procesos son: la sedimentación, filtración, y la adsorción. Cada uno de estos se da en diferentes etapas del proceso depurativo.

La sedimentación, permite la retención de diversos sólidos más densos que el agua. También se presenta la filtración y adsorción por medio del material de soporte de partículas sólidas suspendidas no removida por tratamientos previos, a su vez, da soporte a las plantas del lecho filtrante y promueve la propagación de colonias de microorganismos depuradores. Por lo tanto, así es como estos procesos aunados a los componentes del sistema juegan un importante papel dentro del mecanismo de remoción de contaminantes a través de interacciones del tipo físicas y químicas (Lara Borrero, 1999).

3.6.2 Procesos químicos

En el proceso de tratamiento de aguas contaminadas, existen diversos procesos químicos que controlan parte de la biodegradabilidad de la materia orgánica, así como sus transformaciones. Es de particular interés el flujo del nitrógeno y fósforo en los HA.

La presencia de ambos elementos representa un factor importante para la inducción del fenómeno de eutroficación. Dicho fenómeno consiste en un incremento de la productividad primaria, que se traduce en el detrimento de la calidad del agua debido a que adquiere un color verdoso, olor, sabor y la posible presencia de toxinas producidas por cianobacterias. Asimismo, existe pérdida de claridad y de biodiversidad, asociada a las fuertes fluctuaciones de oxígeno disuelto que ocurren a lo largo del día.

De manera particular el nitrógeno es un elemento vital para la vida ya que los organismos lo emplean para síntesis de proteínas. Todos los organismos necesitan nitrógeno para vivir y crecer. En algunos casos, para que el nitrógeno sea utilizado por

las plantas y los animales, debe ser convertido a una forma química disponible como el amonio (NH_4^+), el nitrato (NO_3^-) o el nitrógeno orgánico (urea $(\text{NH}_3)_2\text{CO}$) (Segura Miranda, 2007).

Hay algunos organismos que fijan el nitrógeno (N_2) de la atmósfera convirtiéndolo en amonio (NH_4^+), a este proceso se le conoce como fijación del nitrógeno. En ambientes acuáticos como en los HA, las algas azules verdosas (en realidad una bacteria llamada cianobacteria) es una importante fijadora de nitrógeno libre sin límites.

Posterior a este proceso, el amonio producido es incorporado en proteínas y otros compuestos de nitrógeno orgánico ya sea por medio de plantas o las mismas bacterias u otros organismos del suelo para ser consumidos por el hombre.

El nitrógeno se incorpora a la materia orgánica y normalmente se convierte en nitrógeno inorgánico mediante un proceso llamado mineralización. Los organismos mueren, la materia orgánica es consumida por bacterias y diversos tipos de hongos despidiendo una gran cantidad de nitrógeno que pronto es convertido en amonio, éste es usado por las plantas para transformarse en nitrato (NO_3^-) mediante un proceso llamado nitrificación.

La nitrificación es un proceso donde el nitrógeno orgánico y amoniacal se oxida, transformándose primero en nitritos y posteriormente en nitratos por medio de bacterias muy especializadas a diferencia de las que promueven la degradación de materia orgánica del medio, este proceso es dependiente de la presencia de oxígeno.

Por último, se presenta la desnitrificación, es aquí donde los nitratos pasan a ser nitrógeno atmosférico por la acción de bacterias llamadas desnitrificantes, este fenómeno enviara el nitrógeno a la atmosfera fuera del cuerpo de agua para cerrar y continuar nuevamente con el ciclo.

En cuanto al fósforo, éste trae como consecuencia gran generación de biomasa, algas y plantas con raíz disminuyendo la claridad del agua y limitando su biodiversidad.

El fósforo se introduce al agua debido a las descargas de detergentes, fertilizantes y residuos contenidos en aguas municipales e industriales. De manera natural el fósforo se encuentra principalmente en el suelo combinado con minerales de hierro, calcio y aluminio, así como en el agua formando ortofosfatos o compuesta de fósforo orgánico. En suelos, donde existe humedad y en medios acuáticos la fracción más importante del fósforo aparece en solución, esta es transportada hacia la vegetación y los microorganismos. En los microorganismos la disponibilidad del fósforo es controlada por los siguientes mecanismos:

Solubilización: las plantas y microorganismos aumentan la disolución de ortofosfatos cuando liberan por medio de sus células: fosfatasa, ácidos orgánicos e inorgánicos, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. Estos últimos podrían reaccionar con el calcio en equilibrio y dejando libre el fósforo en el medio acuoso.

- Mineralización: proceso enzimático producto de la asimilación del fosfato inorgánico. Aproximadamente un 75% de los microorganismos que existen en los suelos son capaces de llevar esta actividad.

Inmovilización: esta actividad se refiere a la introducción de ortofosfato soluble hacia el interior de la célula, proceso temporal, ya que una vez muerta la célula el fósforo se reintegra al medio.

3.6.3 Procesos biológicos

La principal función de los procesos biológicos es estabilizar la materia orgánica, coagular y remover los sólidos coloidales que no sedimentan, así como la remoción de nutrientes y microorganismos que se encuentran en las aguas residuales. Entre los procesos biológicos se encuentran la descomposición de la materia orgánica, los procesos fotosintéticos, la fotooxidación y asimilación microbiana y vegetal. Estos procesos son llevados por las plantas y los microorganismos existentes en el lecho del sistema. En la sección 4.5.3., de este trabajo se proporciona más detalle sobre los principales microorganismos que participan en la depuración de aguas residuales.

CAPÍTULO IV. INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

4 INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

En el contexto del convenio de colaboración académica y de investigación Núm. 18029-314-13-III-06 “Estudios integrales e interdisciplinarios relacionados con la sustentabilidad, la conservación ecológica y la biodiversidad de la zona lacustre de Xo firmado entre la Facultad de Química de la UNAM la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, se definió la ubicación estratégica para la construcción del HAFC en las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC). El diseño está basado en la combinación de estructuras y flujos de alimentación que se proporcionan a humedales artificiales de flujo vertical (HAFV) y de humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH) ya que estos dos diseños presentan ventajas que en su conjunto generan un novedoso arreglo para el desarrollo del presente trabajo. Por una parte, algunos autores como Brix et al. (2008) señalan las ventajas de los HAFV en su sistema de alimentación intermitente en el influente, que a diferencia del HAFH que distribuye a todo lo largo y ancho del lecho la carga de agua residual, permitiendo que esta se infiltre por gravedad a través del medio de soporte. En el HAFC la distribución de agua se hace por arriba del lecho, permitiendo que el influente adquiera oxígeno atmosférico y así poder degradar de manera aerobia los contaminantes presentes.

En términos generales, si se conjuntan las características particulares de cada uno de los dos tipos de sistemas, incorporando mecanismos de distribución hidráulica y adaptando un filtro posterior, es factible obtener un efluente con mayor calidad. Asimismo, existe la posibilidad de cosechar plantas de tipo forrajero y de ornato que le dan un valor añadido al esta ecotécnica (Luna Pabello y Ramírez Carrillo, 2009).

4.1 Aspectos generales

4.1.1 Localización del sistema experimental

El HAFC se construyó en el CIBAC, el cual se encuentra ubicado a un costado de la pista olímpica de remo y canotaje, a 300 metros del embarcadero de Cuemanco

entrando por el periférico Adolfo López Mateos. En este centro se han desarrollado estudios interdisciplinarios de las carreras: Biología, Ingeniería, Química, Agronomía, Arquitectura, Diseño Gráfico y Diseño Industrial, en apoyo a la comunidad de Xochimilco que se ha beneficia de estos trabajos. Es un espacio que ha permitido establecer importantes intercambios científicos con instituciones nacionales e internacionales.

De manera adicional, el CIBAC promueve de forma regular, programas de educación ambiental asociados a actividades de investigación, por lo que se contó con un corredor a las orillas del HAFC con fines educativos y de mantenimiento. Se considera que el sistema experimental, es un proyecto que sin duda beneficia al Canal de Cuemanco, esto también contribuye a generar agua con calidades superiores a las actuales, permitiendo darle el seguimiento a la incrementación en los trabajos de investigación futuros, además de restablecer las condiciones actuales del Canal gradualmente. Lo anterior, refrenda la conveniencia de establecer en ese sitio la tecnología desarrollada por la UNAM, permitiendo unir fortalezas académicas para alcanzar mejores logros.

De manera específica, el sistema experimental se encuentra ubicado en la esquina sureste de las instalaciones del CIBAC, a las orillas de uno de los canales del Lago de Xochimilco, en el canal denominado como Cuemanco. La selección se basó en el espacio requerido para la obra, la facilidad y bajo costo en la extracción del agua del lago de Cuemanco con la que se alimentaría al sistema y la restricción de acceso a personas ajenas que pudieran ocasionar daños a la estructura en general.

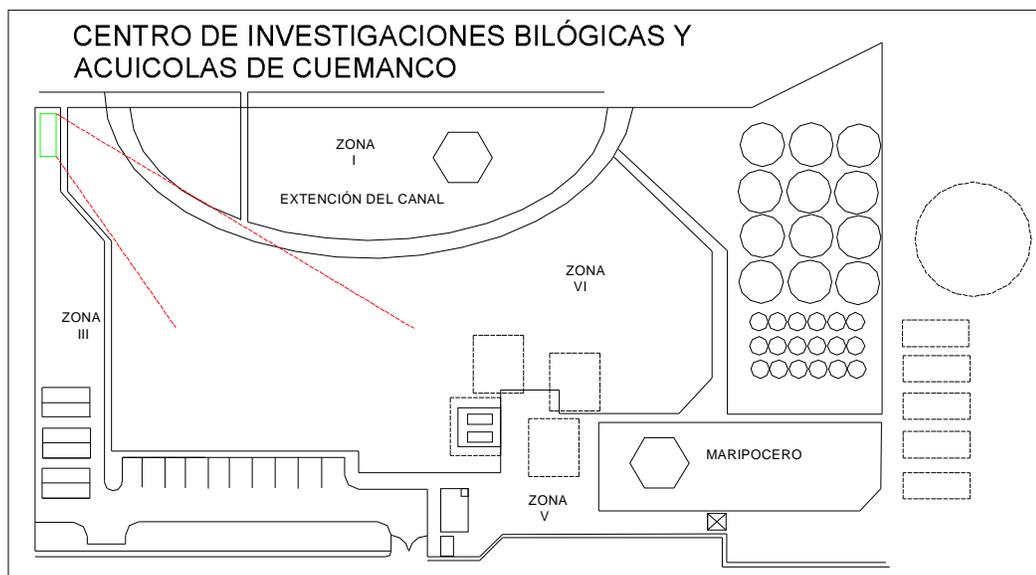


Figura 3. Ubicación del sistema experimental.

4.1.2 Condiciones climatológicas de la ZMCM

En general durante los 365 días del año, en la mayor parte del territorio de la zona metropolitana de la Ciudad de México se presenta clima Templado subhúmedo (87%).

En el resto se encuentra clima seco a semiseco (7%) y templado húmedo (6%).

La temperatura media anual en el Valle de México y alrededores es de 22°C.

La temperatura más alta, se presenta en los meses de marzo a mayo (25°C) y la más baja, alrededor de 5°C en la mayoría de la zona, en los meses de octubre a enero.

Las lluvias se presentan en verano con una precipitación total anual variable: en ciertas regiones es de 600 mm y en la parte templada húmeda como es el Ajusco es de 1 200 mm anuales.

La zona urbana ocupa la mayor parte del territorio, pero hacia la parte sur y sureste se encuentran zonas agrícolas como lo es Xochimilco que cuenta con 404, 458

habitantes. La actividad agrícola es, principalmente de temporal, donde se cultiva maíz, frijol, avena y nopal entre otras, siendo importantes también las hortalizas y la floricultura (INEGI, 2009).

4.1.3 Características del agua en el Canal de Cuemanco

Su composición es variada así como sus características físicas. El agua de los canales de Cuemanco cuenta con apariencia verdosa, turbia en ocasiones, presenta un olor a residuos de uso domestico y presenta sólidos visibles. Presenta niveles importantes de materia orgánica, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nutrientes, compuestos tóxicos y microorganismos de interés sanitario (Sandoval Contreras, 2008).

4.2 Descripción del sistema experimental

El sistema experimental propuesto para el tratamiento del agua procedente del canal de Cuemanco consiste en un sedimentador primario, el humedal artificial, dos tanques de almacenamiento y un filtro de pulimento (ver Figura 15). El siguiente diagrama de bloques (Figura 4) muestra la secuencia de las etapas que conforman el proceso depurativo.

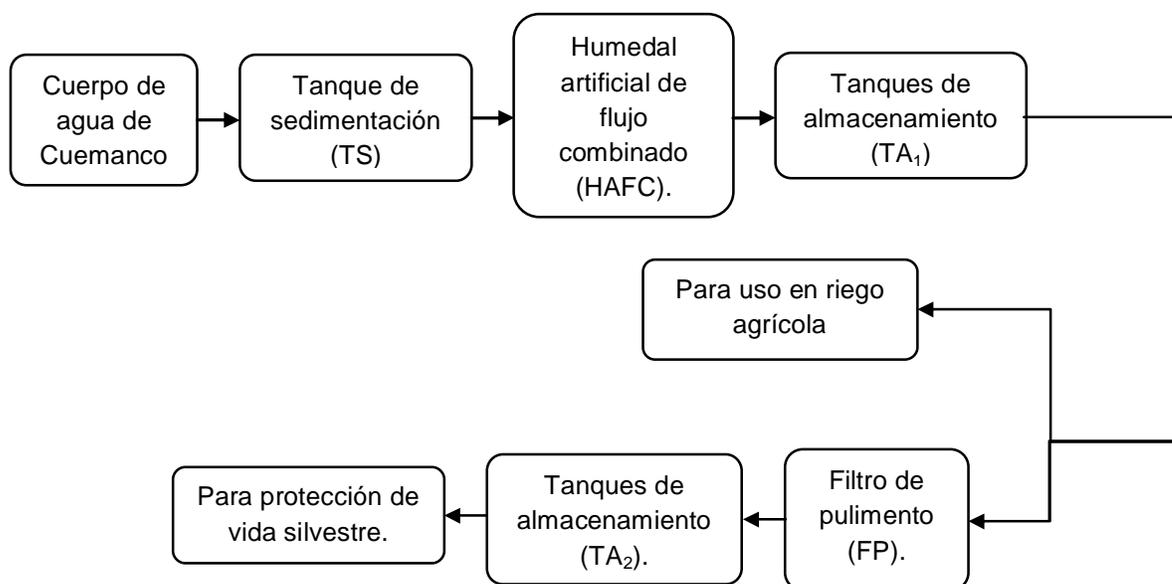


Figura 4. Diagrama de bloques del humedal artificial de flujo combinado.

4.2.1 Sedimentador primario

Este tanque se considera como una etapa primaria en los sistemas de tratamientos de aguas residuales. Tiene como función eliminar los sólidos de mayor tamaño, así como los más fácilmente sedimentables y los de densidad menor a la del agua. Estos equipos, aunque no contribuyen a eliminar material contaminante disuelto, evitan que ocurra una incorporación posterior, por disolución, lo cual retardaría la depuración del agua (Crites y Tchobanoglous, 2005).

El sedimentador consta de un tinaco rotoplas modificado con mamparas interiores que faciliten el choque del agua y retener más eficientemente los sólidos sedimentables, este tanque tiene una capacidad de 2500 litros ubicado al inicio del tratamiento en el sistema. Tiene como función retener los sólidos de mayor tamaño que contengan el agua residual extraída del canal de Cuemanco.

Este tanque posee dos orificios, uno de entrada y otro de salida. El tanque se encuentra acondicionado con un sistema de mamparas que evitan la agitación del agua del canal de Cuemanco que entra al tanque, cuyo ingreso es controlado mediante electroneveles. La alimentación al HAFC se efectúa por descarga controlada con ayuda de sólidos suspendidos en el filtro de paso.

4.2.2 Humedal artificial de flujo combinado

El diseño de los HA en general, está basado en criterios de operatividad, calidad de agua que se desea tratar (carga orgánica medida como DQO y DBO), la presencia de Nitrógeno y Fósforo, el tiempo de residencia hidráulico (TRH), la razón de carga hidráulica (RCH), calidad de agua que se desea obtener y destinos a los que se desee enviar para ser reutilizada, condiciones del área, abastecimiento del influente y servicios auxiliares, condiciones geológicas etc.

Este sistema en particular, cuenta con dos innovaciones principales: a) posee la característica de poder operar tanto en forma vertical, como horizontal, debido a el tipo de colocación de válvulas de control en la tubería de alimentación y b) Cuando el sistema de alimentación es de modo de flujo vertical, mediante microaspersión-aireación controlada.

El HAFC tiene una capacidad de lecho de 32.5 m³ cuya área total es de de 55 m² con dimensiones de 11 m de largo por 5 m de ancho, se alimenta con un flujo promedio de 3 a 6 m³/día, equivalente a una carga hidráulica superficial (CHS) de 72 mm³/mm² día. El lecho cuenta con tres horizontes colocados de manera vertical. La descarga de agua a tratar se realiza de forma tal, que fluye, en el material de empaque, de manera horizontal o vertical, según se opere el sistema.

4.2.3 Tanque de almacenamiento

El sistema experimental cuenta con un sistema de almacenamiento de dos tanques rotoplas de 500 litros (ver Figura 15). Estos tanques se encuentran al final del sistema experimental. La función de dichos tanques, es el almacenamiento del agua tratada temporalmente para después ser enviada mediante bombeo a riego y/o reintegración al canal de Cuemanco.

Éste tanque esta hecho de polietileno lineal de alta calidad, aprobada como envase de varios usos. Sus dimensiones son de 87 cm por 142 cm y una capacidad de 0.5 m³. Cuenta con una capa exterior negra con protección contra rayos ultravioleta que inhibe la formación de microorganismos y aumenta la duración del tinaco. En su interior, cuenta con un acabado de color azul que da soporte y fuerza a las paredes del tanque y permite apreciar la presencia o no de partículas suspendidas y sedimentadas.

4.2.4 Filtro de pulimento FP

El HAFC opera en conjunto con un filtro de pulimento (FP) de desnitrificación y remoción de ortofosfatos solubles (PO₄³⁻).

El tanque de pulimento es un cárcamo de concreto ubicado en la salida del lecho al final del tren de tratamiento, éste tiene una capacidad de 2.5 m³ aproximadamente con material mineral calizo, distribuido en dos horizontes verticales de entre 90 y 15 cm aproximadamente que reaccionan con los fosfatos (PO₄³⁻) y cuyo tamaño de partícula se ubica entre 1 y 2 mm (Luna Pabello y Ramírez Carrillo, 2004; Westholm, 2006) este lecho cuenta con condiciones anaerobias en su parte inferior, lo que facilita la transformación del nitrato (NO₃⁻) a nitrógeno atmosférico (N₂).

Por otra parte, los fosfatos se presentan en el agua residual con la característica de formar diversos compuestos como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos entre otros. Estos minerales se remueven mediante mecanismos de adsorción y precipitación dentro del tanque de pulimento mediante el medio de soporte. El fósforo inorgánico es retenido por compuestos tales como los óxidos e hidróxidos de aluminio, calcio y hierro (Ramírez Carrillo, 1998).

Dada la importancia que conforma la estructura del HA para el presente trabajo, a continuación se profundizará en los detalles relacionados con su conformación.

El filtro de pulimento cuenta con una conformación de material calizo con características tales que permiten remover compuestos nitrogenados y fosfatados que contenga el agua tratada por el sistema experimental previo al sistema de tratamiento. Esta agua será utilizada para la propagación de especies endémicas de la zona del lago de Cuemanco.

La descripción detallada de los componentes se encuentra en la sección 4.4 de este trabajo.

4.3 Componentes del HAFC y forma de alimentación

Dada la importancia y procesos de mayor relevancia en la depuración de aguas residuales en el sistema experimental, se describe a continuación la composición detallada del humedal artificial de flujo combinado.

Para los fines de depuración en el sistema se empleó un filtro de material volcánico seccionado en diferentes horizontes para una mayor eficiencia con base en experimentos de laboratorio previos a la construcción.

Este filtro es la etapa de mayor importancia dentro del tren de tratamiento ya que en él se colocaron diferentes tipos de plantas que complementaron el proceso de depuración del agua residual.

4.3.1 Material de empaque

Las características del lecho (tipo y tamaño de partícula), en conjunto con las plantas, conforman la hidráulica, que a su vez determina el régimen de flujo del sistema. Los lechos seleccionados con una estructura estable proporcionan condiciones óptimas para la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración, las cuales contribuyen a la determinación del tiempo de residencia hidráulico requerido por el sistema para la depuración del agua residual (Jiménez Tovar, 1999).

En cuanto a la composición del lecho, es recomendable el evitar arreglos a base de arena fina y/o arcilla (con diámetros menores a 0.5 mm), debido a que son materiales fácilmente compactables e inestables, limitan la infiltración y la conductividad hidráulica del sistema (Drizo *et al.* 2000).

Dado las características físicas de cada material, cuando se presenta azolvamiento por la acumulación de diferentes tipos de sólidos, más comúnmente al principio del sistema o en el fondo del lecho, se reducen los espacios del medio y el área efectiva de tratamiento. Tal efecto produce un incremento en la conductividad hidráulica lo que provoca un tiempo menor de residencia hidráulica. Por tales razones, el lecho pudiera presentar inundaciones al principio del sistema, este hecho también puede presentarse si la concentración del influente supera el diseño del sistema. Una vez que el sistema llegue al estado estacionario, no solo física, sino biológica y químicamente, aunado a la aclimatación de las plantas y los microorganismos, la

depuración será más eficiente en el sistema; esto reflejara un aporte continuo de oxígeno, temperatura más estable y disponibilidad consistente de nutrientes (Fenoglio Limón, 2000).

Para fines de este trabajo, se determinaron los materiales y diámetros de partícula mediante pruebas en equipos y columnas piloto en el laboratorio, llegando a la óptima estructura del empaque (Figura 5) y al material adecuado para el uso y tipo de agua residual a tratar. Esto se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Volumen de material de soporte y tamaño de partícula requeridos.

Material	Tamaño de partícula (mm)	Volumen (m ³)	Volumen + 20% adicional por posibles mermas
Dren superior	20-40	2.5	3
Soporte principal	1-2	20	24
Dren inferior	10-20	7.5	9

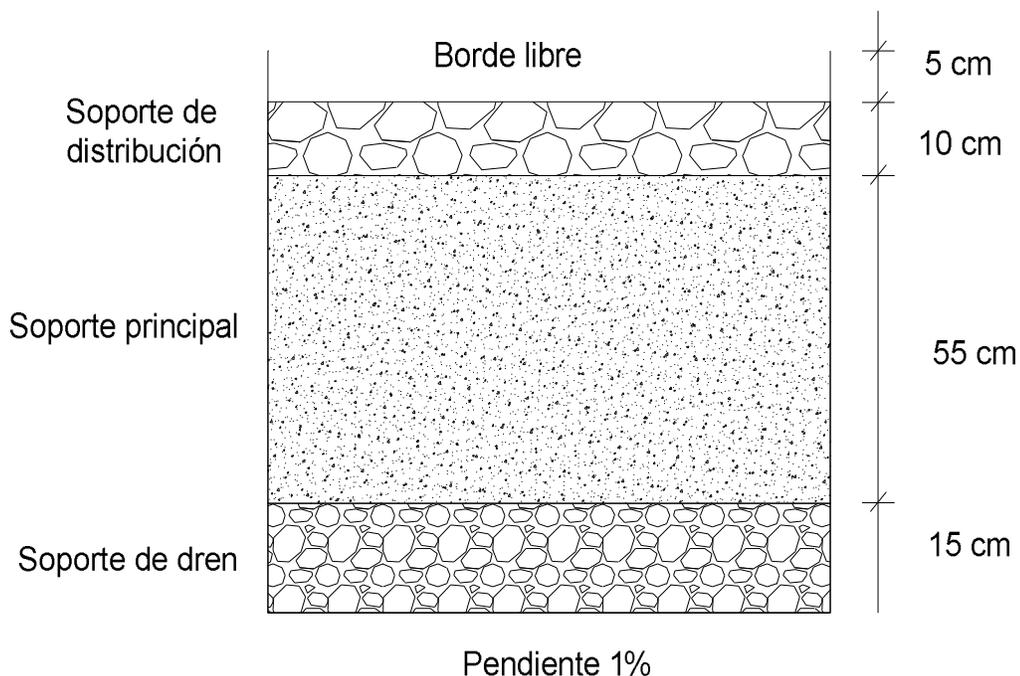


Figura 5. Perfil granulométrico del material de empaque.

En la selección de material óptimo deben considerarse los siguientes puntos:

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

4.3.2 Plantas vasculares de uso común en HAFC

La integración de plantas en el lecho empacado es primordial, ya que las plantas hacen más efectiva la remoción de la materia orgánica. El tipo de humedal que se describe en este trabajo posee características de un sistema de plantas emergentes así como de los humedales de flujo subterráneo. En estos sistemas las raíces de las plantas se encuentran soportadas en un lecho, el cual puede estar construido con gravilla, arena, arcilla u otro material de soporte para las vegetaciones emergentes.

En los humedales de flujo subterráneo el influente se filtra al interior del lecho y se pone en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Dado el arreglo se presentan condiciones tanto aerobias en las zonas cercanas a la rizosfera (zona donde las raíces y rizomas se adhieren al lecho del sistema) como anaerobias en zonas alejadas de las plantas.

En todos los sistemas de humedales las plantas proveen de energía a los organismos herótrofos, como animales, bacterias y hongos. En especial, los hongos son los que desarrollan la mayor actividad degradadora de materia orgánica. La presencia de plantas es quizá la característica más importante que poseen los humedales (Ramírez Carrillo, 1998).

En general, las plantas ofrecen diversos beneficios a los humedales. Gracias al crecimiento de las raíces y de los tallos se facilita la existencia de microorganismos de tipo aerobio, que aumenta y acelera la depuración y remoción de materia orgánica en el agua. A su vez, favorece la capacidad de infiltración y conductividad hidráulica en el medio y beneficiando la sedimentación y filtración de las partículas solidas.

Asimismo, las plantas también requieren de nutrimentos para su desarrollo el cual lo toman por medio de las raíces y los rizomas del agua, este fenómeno aumenta en ciertas épocas del año, ya que en estas épocas (primavera y verano) aumenta la reproducción y crecimiento de las plantas.

Existen reportes que indican que las macrofitas liberan oxígeno de sus raíces y rizomas, provocando así que los microorganismos aerobios y anaerobios aumenten la actividad de los ciclos biogeoquímicos, trayendo como consecuencia, la degradación de materia orgánica (Luna Pabello y Ramírez, 2009). También se sabe que las macrofitas liberan cierta concentración de antibióticos desde el rizoma, eliminando un gran número de diversas bacterias del tipo coliforme y salmonela.

Diferentes variedades de especies vegetales han sido seleccionadas para el uso en los diferentes tipos de humedales artificiales como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Especies vegetales de uso frecuente en humedales artificiales.

Género-Especie (nombre común)	Temperatura deseable °C	Tolerancia máx. por salinidad (mg/L)	pH óptimo	Penetración de la raíz (m)
Typha- <i>T. latifolia</i> (Tule)	10-30	30000	4-10	0.3-0.4
Phragmites- <i>P. australis</i> (Carrizo)	12-33	45000	2-8	>0.6
Schoenoplectus- <i>S. californicus</i> (Juncos)	16-27	20000	4-9	0.2-0.3

Para este proyecto en especial se utilizaron plantas de diferente especie para observar el comportamiento depurativo en diferentes secciones.

En el lecho del HAFC se colocaron tres especies diferentes de plantas: carrizos (*Arundo donax*), alfalfa (*Medicago sativa*) y alcatraces blancos (*Zandechia aethiopica*).

Las primeras son plantas vasculares que comúnmente son usadas en los HA existentes en México; en cuanto a las segundas, se estableció la opción de utilizarlas como especies altamente viables, debido a su valor como fitorremediadora y a su potencial para servir como subproducto forrajero. En el caso del alcatraz, cuenta con un valor comercial como planta de ornato y en sí misma incrementa las cualidades estéticas del HA, además de poseer cierta capacidad depuradora. Para la siembra de las tres especies de plantas, el HAFC se dividió en tres secciones de iguales dimensiones, uno para cada especie, con el fin de evaluar mediante estudios a futuro el efecto de remoción de cada una (Luna Pabello y Ramírez Carrillo, 2009)

4.3.3 Microorganismos participantes en la depuración

Los microorganismos son la base fundamental en el funcionamiento de humedales, ya que de ellos depende la remoción de la materia orgánica presente en el agua. Por lo general, existen compuestos que pueden ser biotransformados por parte de los microorganismos como lo son compuestos nitrogenados, fosfatados y compuestos de carbono. Algunos de estos microorganismos funcionan como predadores de otros microorganismos no deseados, así que su actividad depurativa no se limita a la eliminación de compuestos orgánicos únicamente sino que también tienen la capacidad de realizar la desinfección del agua (Fenoglio Limón, 2000). La diversidad y abundancia de ciertos parásitos está estrechamente asociada con la calidad del agua en que se encuentran inmersas, respondiendo rápidamente a los cambios físicos y químicos característicos del ambiente (Luna Pabello, 2005). En las comunidades naturales existen decenas de especies, las cuales desempeñan diversas funciones. Los protozoos tienen gran importancia ecológica, por ejemplo los flagelados autótrofos son importantes como productores de materia orgánica en ambientes acuáticos mientras que los flagelados heterótrofos, ciliados y sarcodinos actúan como depredadores, al alimentarse de otros microorganismos, además de participar en la degradación de materia orgánica. Específicamente, existen compuestos biodegradables en la materia orgánica, estos pueden ser eliminados por la intervención de microorganismos procariontes, como las bacterias, y de los eucariontes, como las algas, hongos microscópicos, protozoos como ya se había mencionado con anterioridad, rotíferos y

nemátodos. Estos microorganismos son los responsables de transformar porciones considerables de materia orgánica disuelta de fácil biodegradación, a sólidos biológicos (aglomeraciones de comunidades microbianas) que pueden ser separados mediante procesos físicos.

Con lo antes mencionado, y para darse una idea del tipo de microorganismos presentes en las aguas residuales más comúnmente encontrados, algunos de ellos efectuando acciones depurativas mientras que otros lo harán como indicadores de la calidad del agua a tratar. Por ejemplo, protozoos, rotíferos y nemátodos, son microorganismos que principalmente se les puede encontrar en aguas con poca materia orgánica y altos tiempos de residencia hidráulicos; por lo que su presencia en sistemas de tratamiento aerobios de aguas residuales indicaría poca o baja concentración de contaminantes en dichas aguas. Al contrario, la presencia de microorganismos como son flagelados, ciliados y amibas, entre otros, serían microorganismos indicadores de la existencia de alta presencia de materia orgánica y bajo tiempo de residencia hidráulico, lo que indicaría por lo tanto que la concentración de contaminantes en el sistema de tratamiento aerobio de aguas residuales es muy elevada.

Por último, el conocer los microorganismos que se encuentran en los sistemas de tratamiento de aguas residuales es muy importante, ya que ellos darán una estructura de las comunidades a lo largo del sistema, nos darán una idea de cómo se está llevando a cabo el proceso de depuración y si la calidad de agua es buena o mala, dando cierta información que permita saber el funcionamiento del sistema. Por otro lado también es importante conocer los microorganismos que intervienen en el proceso de depuración en las aguas residuales ya que estos podrían ser usados como bioindicadores de contaminación en el proceso depurativo.

4.3.4 Formas de alimentación de HAFC

El lecho del humedal artificial de flujo combinado (HAFC) será alimentado de dos maneras; de forma vertical y de forma horizontal las cuales se pueden modificar con la apertura y cierre de las válvulas respectivas. La alimentación horizontal se encuentra al

inicio del sistema hidráulico. Esta alimentación abastece al sistema cuando la válvula central del sistema de riego se encuentra cerrada y las dos laterales abiertas. De esta forma el agua es distribuida a lo ancho del área que conforma el sistema como se muestra en la Figura 6.

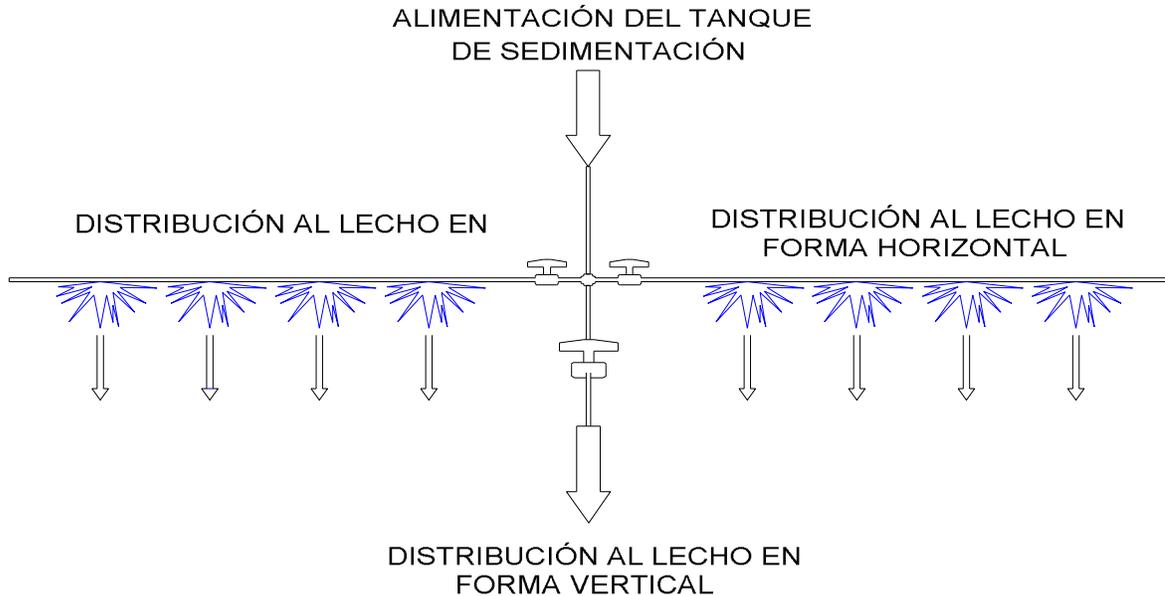


Figura 6. Arreglo hidráulico de apertura y cierre de válvulas.

En la alimentación se cuenta con dos características: no cuentan con válvulas independientes en cada línea; es decir, toda la carga se controla y regula con la válvula central, y en cada una de las líneas se encuentran microaspersores los cuales se encargan de distribuir la descarga de agua mediante microaspersión.

Cada aspersor distribuye el agua sobre el lecho en una circunferencia de aproximadamente 50 cm de diámetro, y a una altura no mayor de 15 cm.

La aspersión moja el lecho y el agua desciende en el mismo mediante gravedad, en la parte interna del lecho se encuentra un segundo arreglo hidráulico, el cual captura y envía el agua a la zona de almacenamiento al final del sistema.

4.4 Actividades de construcción del HAFC

Una vez culminadas las etapas preliminares de construcción (selección de sitio, acondicionamiento de materiales, siembra de plantas entre otras), se prosigue con la

construcción e instalación y funcionalidad de los equipos empleados en el proceso. Estas pruebas son previas al arranque del sistema experimental. En esta sección, se abordarán las etapas relacionadas con la construcción del sistema experimental en las instalaciones del CIBAC. Posteriormente, se mencionará una breve descripción del proceso.

4.4.1 Excavación

En esta etapa se llevo a cabo la excavación del la superficie que contendrá el material de empaque con unas dimensiones de 11 m de largo y 5 m de ancho con una profundidad de entre los 0.6 y 0.9 m. La excavación se llevó a cabo mediante personal de apoyo y maquinaria de excavación.

4.4.2 Sistema de drenado

Previo al relleno del lecho con el material de empaque seleccionado, se colocó la tubería de drenado del agua residual a tratar. El lecho consta de dos sistemas de drenado y uno de aireación.

i. Tubería de drenado para el flujo vertical del HAFC

Este arreglo cuenta con cuatro tubos colocados a lo largo del lecho Figura 7. Estos tubos se encuentran conectados a un quinto tubo, el cual se encuentra ubicado al final del lecho, en posición transversal. Adicionalmente, a cada uno de los cuatro tubos mencionados, se le conectó por los extremos opuestos, un tubo de aireación en forma de poste. Estos tubos tienen una altura de 30 cm por encima de la superficie del lecho.

A lo largo de las líneas de drenado se encuentran de igual manera perforaciones de un centímetro de diámetro en toda su sección, estos a su vez, con una distancia de 5 cm entre cada perforación. Los tubos de aireación no cuentan con perforaciones como los tubos de drenado.



Figura 7. Tubería de drenado vertical del agua residual a tratar.

ii. Tubería de drenado para el flujo horizontal del HAFC

Esta línea se localiza al final del lecho y se encuentra unida a un tubo en posición transversal al lecho (Figura 8).

Aunado a esta línea, se colocaron dos tubos de aireación en los extremos en formas de postes. Estos tubos tienen una altura de 30 cm por encima de la superficie del lecho.

A lo largo de las líneas de drenado se encuentran de igual manera perforaciones de un centímetro de diámetro en toda su sección, estos a su vez, con una distancia de 5 cm entre cada perforación.



Figura 8. Tubería de drenado horizontal del agua residual a tratar.

iii. Tubería de aireación y muestreo del HAFC

El arreglo consta de ocho tubos localizados en el seno del lecho, están colocados en la forma y distancia que se muestra en la Figura 9. Estos tubos no tienen conexión alguna con los tubos de drenado en los fondos y tienen perforaciones de un centímetro de diámetro en toda su sección, con una distancia de 5 cm entre cada perforación, estos tubos también sirven para coleccionar muestras en diferentes zonas del lecho del Humedal.



Figura 9. Tubería de aireación y muestreo del agua residual a tratar.

iv. Tubería de aireación para el dren vertical y horizontal del HAFC

Estos tubos se localizan al final de las líneas del dren vertical y en los extremos del dren horizontal; estos tubos permiten evitar el vacío en las líneas de drenado y evitar la inundación.

4.4.3 Relleno del lecho filtrante del HAFC

En esta etapa se dispuso a hacer el relleno según el perfil granulométrico (Figura 5 de este trabajo). Las maniobras se llevaron a cabo con apoyo de estudiantes de la Facultad de Química de la UNAM.

4.4.4 Sistema de distribución hidráulica del HAFC

En esta atapa se colocaron líneas de tubo de PVC a una distancia de $20\pm$ cm de la superficie del lecho filtrante con un arreglo de válvulas, tal que permita abastecer de forma vertical u horizontal las descargas de agua en el lecho. Como se había mencionado con anterioridad, la distribución horizontal se llevará a cabo mediante la abertura de válvulas laterales y cierre de una válvula central en el cuerpo del esqueleto (Figura 10). Para la distribución de forma vertical se llevara a cabo mediante microaspersión de tal forma que las válvulas laterales se encuentren cerradas y la válvula central abierta.

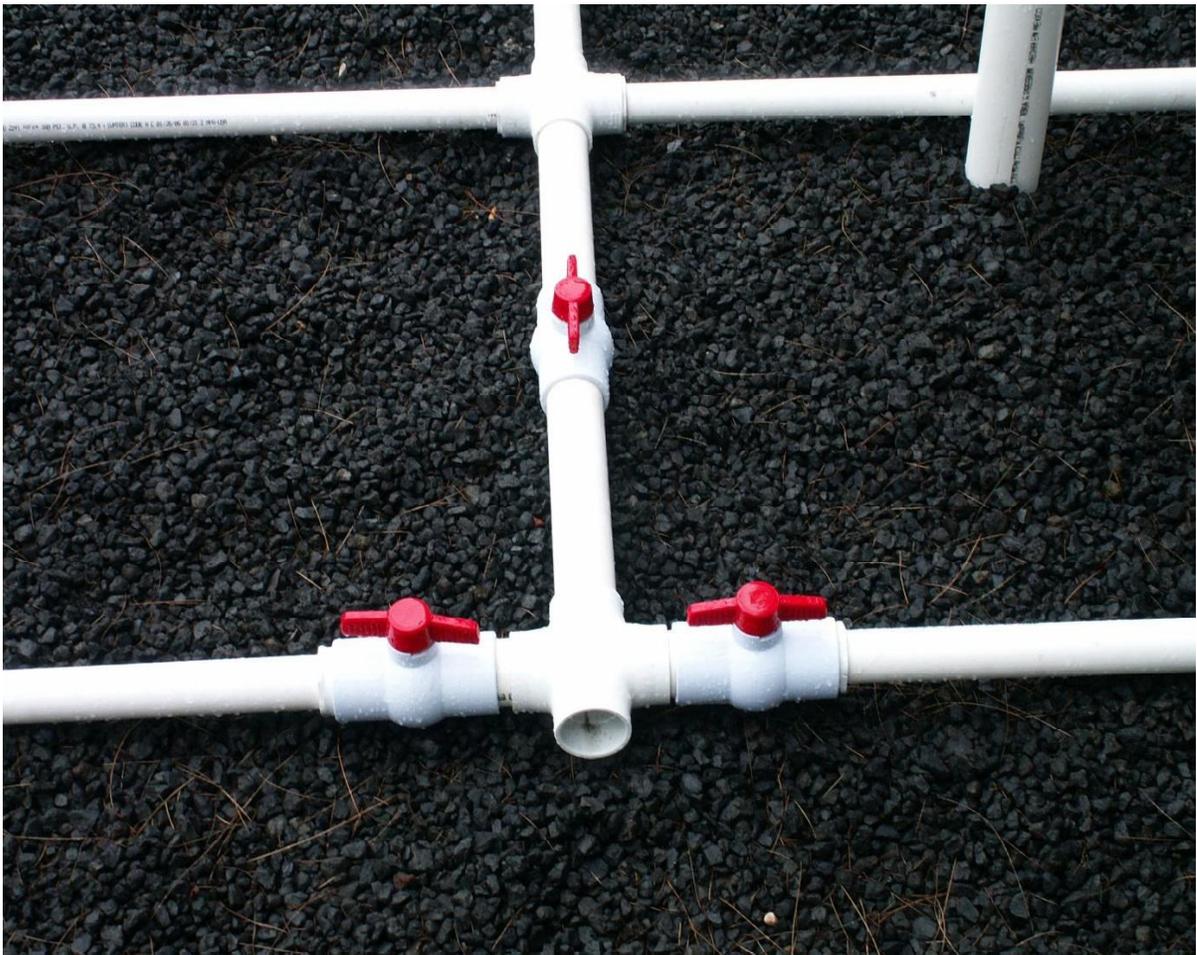


Figura 10. Arreglo de válvulas del agua residual a tratar en el HAFC.



Figura 11. Líneas de distribución del agua residual a tratar en el HAFC.



Figura 12. Distribución del agua a tratar por microaspersión.

4.4.5 Filtro de pulimento

Como se había mencionado en el punto 4.2.4., el sistema cuenta con un filtro de pulimento con la finalidad de. Dicho filtro, cuenta con material del tipo mineral calizo el cual tiene como función remover compuestos de nitrógeno y fósforo como se muestra en la siguiente figura.



Figura 13. Filtro de pulimento.

4.4.6 Colocación de plantas vasculares en el HAFC

Como se había mencionado en la sección 4.5.2., de este trabajo, en el lecho del HA se colocaron tres especies diferentes de plantas: carrizos (*Arundo donax*), alfalfa (*Medicago sativa*) y alcatraces blancos (*Zandechia aethiopica*).

La mecánica de plantación se llevo a cabo de forma manual, de acuerdo a los siguientes pasos:

Seccionar el rizoma en segmentos de 0.15 m de longitud.

- Aplicar con una brocha o pincel una solución de enraizador comercial en una proporción de 2 g. por cada litro de agua a lo largo de todo el rizoma. Cultivar el rizoma en un sustrato a base de turba y mantillo (El espesor del sustrato tendrá una profundidad de 0.30 m).
- ◊ Formar una cavidad en el sustrato de 0.15 m de diámetro por 0.05 a 0.07 m de profundidad.
- Introducir el rizoma en la cavidad del sustrato a una profundidad de entre 0.05 y 0.07 m. y agregar 5 mL de la solución enraizadora previamente utilizada para permitir la viabilidad de los organismos.

Este procedimiento se empleo para los tres tipos de plantas en el sistema experimental.

4.4.7 Diagramas del sistema experimental construido

En el ANEXO, se presentan los diagramas de una vista frontal y vista lateral, al mismo tiempo se observa la secuencia de los equipos en el sistema experimental mediante el cual se lleva a cabo la depuración de las aguas residuales provenientes del canal de Cuemanco.

4.4.8 Descripción del proceso del HAFC

El agua para su tratamiento será extraída del Canal de Cuemanco del Lago de Xochimilco.

La extracción del agua del canal se hace mediante una bomba de 1.5 HP con una centímetros para evitar la succión de basura de mayor volumen. El agua extraída entra al tanque de sedimentación (etapa de pretratamiento).

Transcurrido el tiempo de sedimentación se activa una segunda bomba de 1.5 HP, previo a esta bomba se encuentra un filtro de membrana plástica para retener sólidos suspendidos de menor tamaño. La segunda bomba se encarga de distribuir el agua al

lecho filtrante de forma vertical (mediante la microaspersión) u horizontal según se haya dispuesto el arreglo de válvulas que se requiera mediante gravedad, en el cual se llevan a cabo los procesos biológicos físicos y químicos.

El sistema está programado para tratar un volumen de 5 a 6 m³ de agua cada 24 horas. Transcurrido el tiempo de residencia hidráulico dentro del lecho filtrante en el sistema experimental, el agua cae por gravedad a un cárcamo donde se encuentra un tanque de almacenamiento de 0.5 m³ en el cual se almacena temporalmente el agua residual tratada (agua tipo A, riego hidropónico).

Por último, el 50% del agua tratada es transportada al filtro de pulimento donde se inicia un nuevo tratamiento para la eliminación de nutrientes presentes en el agua como ortofosfatos y nitratos (agua tipo B, prevención de la eutroficación y protección de vida silvestre). Este efluente se envía periódicamente a los acuarios en donde se realiza la investigación para el cultivo del ajolote (*Ambystoma mexicanum*) principalmente.

CAPÍTULO V. ETAPA DE ARRANQUE DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

5 ETAPA DE ARRANQUE DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El siguiente paso a la construcción del sistema experimental fue la etapa de arranque de operaciones. En esta etapa se llevaron a cabo actividades relacionadas con la operación en general del sistema, en este tiempo se observaron fallas y se realizaron las correcciones pertinentes de problemas con el equipo e instalaciones del sistema en general. Esto permitió establecer programas de mantenimiento en el sistema que ayudaron a elevar la eficiencia y estabilidad depurativa del sistema en un futuro.

Para el sistema experimental construido en las instalaciones del CIBAC, la etapa de pruebas en todo su conjunto llevo un periodo de tiempo de aproximadamente un año al cabo de su construcción, este tiempo fue suficiente para observar el comportamiento preliminar del equipo y las instalaciones. Durante este tiempo también se realizaron los muestreos correspondientes en la zona del influente, el lecho y el efluente para los análisis fisicoquímicos y biológicos correspondientes. Asimismo, en el transcurso de este tiempo, se observaron los problemas en el desarrollo del proceso lo cual es crucial para futuros sistema.

En este capítulo, se describen los puntos más importantes que representan a la etapa de arranque del sistema experimental en las instalaciones del CIBAC.

5.1. Pruebas operativas

En el arranque del sistema, se evaluaron operaciones parciales como globales del sistema experimental, se revisaron los instrumentos de control, se hicieron pruebas de tiempos y del manejo de estos equipos. Se estimó la eficiencia de los sistemas hidráulicos en general incluidos los equipos de bombeo.

Dentro de las pruebas e inspecciones que se realizaron en el sistema se encuentran:

- Sistema de succión
- Sistema de pretratamiento (tanque de sedimentación)
 - Las mamparas del tanque de sedimentación

- Sistema de filtros
- Sistema de válvulas de control
- Sistema de aspersión
- Colocación de plantas
- Sistema de distribución vertical
- Sistema de distribución horizontal
- Sistema de válvulas de salida en el sistema
- Sistema de electroniveles
- Sistema de bombeo para la distribución del efluente
- Sistema de tratamiento horizontal
- Posibles destinos de los efluentes
- Fugas en todo el sistema experimental
- Purga de bombas en el influente y efluente
- Conexiones eléctricas
- Revisión de posibles filtraciones en registros de la instalación eléctrica
- Obstrucciones en aspersores
- Voltaje adecuado en el panel de control

Estas son las pruebas en las que se les dio más cuidado ya que se realizaron en el arranque del sistema y los equipos. Se plantearon estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo que han mejorado el sistema y han disminuido los tiempos de revisión personal lo cual ha permitido que la automatización se encuentre estable.

5.1.1 Pruebas en bombas

Estos equipos son electrobombas de tipo autocebante, de 1.5 caballo, con impulsor abierto inatascable de 1.5 pulgadas de diámetro. Los diámetros de tubería de la succión y descarga son de 2 pulgadas.

El sistema de abastecimiento y distribución de las bombas se puso en funcionamiento siendo este controlado mediante un instrumento de control. Se

verificaron posibles fugas en las conexiones de succión y descarga. Se verificaron ruidos ajenos al funcionamiento, tomas de corriente y fallas en general (Tyler G. Hicks, 1960).

5.1.2 Pruebas en líneas de distribución

Una vez puesto en funcionamiento el sistema de tratamiento se hizo una inspección visual en las uniones de todo el sistema hidráulico, cerciorándose de que no existieran fugas o taponamientos que ocasionaran cambios de presión y/o rupturas en las líneas. La mala verificación y operación de las líneas podría traer consigo: pérdidas en el influente, zonas de encharcamiento, cambios en la presión del agua en las líneas de distribución por salidas u obstrucciones, etc.

5.1.3 Pruebas en líneas de captación

Para la evaluación de prueba, se realizó un balance teórico global de agua durante el tiempo de operación del sistema; ver ANEXO. Las razones por las cuales es importante verificar las líneas de captación son con el fin de localizar fugas en el lecho del sistema o cualquiera de las partes que lo conforman. Así también es importante hacer las estimaciones de la evapotranspiración del medio filtrante y las plantas en conjunto. Es importante mencionar que los valores de las pérdidas por la evapotranspiración y aportes de agua por precipitación, en este sistema en particular son insignificantes, sin embargo, es de suma importancia tomar en cuenta estos valores en sistemas donde la superficie en los sistemas sea de mayor tamaño.

5.2 Análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos

Durante la etapa de arranque es importante llevar a cabo la evaluación de los equipos así como de los instrumentos. Pero más aun, es importante llevar un registro en parámetros fisicoquímicos y biológicos los cuales reflejan la depuración y transformación de las aguas contaminadas en los sistemas de tratamiento. Existen distintos parámetros que indican la calidad del agua. Para fines de este trabajo se

hicieron mediciones de doce distintos parámetros en ubicaciones diferentes del tren que conforma el sistema de tratamiento.

Los parámetros a medir serán:

- Conductividad eléctrica (CE).
- Demanda química de oxígeno (DQO).
- Nitratos (NO_3^-).
- Nitritos (NO_2^-).
- Nitrógeno amoniacal (NH_4^+).
- Ortofosfatos (PO_4^{3-}).
- Oxígeno disuelto (OD).
- pH
- Sólidos disueltos totales (ST).
- Sólidos sedimentables (Sse).
- Sólidos suspendidos totales y (SST)
- Temperatura (T).

Por motivos que llevan a evaluar las condiciones de agua en este sistema experimental, se hizo un mayor énfasis en los parámetros del oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, ortofosfatos, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. A su vez, se evaluaron dos tipos de agua, como se había mencionado con anterioridad: la primera proveniente del sistema de tratamiento del humedal artificial, agua del tipo (A), que está a su vez, será el influente hacia el filtro de pulimento y se obtuvo agua del tipo (B) en el efluente como lo indica la Figura 4. En cuanto a estos parámetros y los restantes, los resultados numéricos se reportan en el ANEXO de este trabajo, para cada una de las etapas del tratamiento del sistema experimental.

5.2.1 Oxígeno disuelto

En aguas naturales, residuales y residuales tratadas los niveles de oxígeno disuelto dependen de las actividades químicas, físicas y bioquímicas (NMX-AA-012-1980). La solubilidad del oxígeno en agua está relacionada con muchos factores; además de los citados también se encuentra la temperatura y presión, así como la concentración salina del agua. Además, el origen del agua o su procedencia condiciona el nivel del oxígeno disuelto (OD). Así, las aguas profundas o subterráneas suelen contener solo algunos miligramos de oxígeno por litro ($1 < O_2$). En contraposición, las aguas superficiales pueden contener cantidades importantes, cercanas a la saturación

5.2.2 Demanda química de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de materia orgánica e inorgánica que en un cuerpo de agua es susceptible de ser oxidado por un oxidante fuerte.

5.2.3 Ortofosfatos

El fósforo es generalmente encontrado en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Estos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, como los son productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, industrias, etc. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas (NMX-AA-029-1981).

5.2.4 Nitratos

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, este se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas. El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas

residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones altas. El nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos, y en algunos casos ha sido identificado como el determinante del crecimiento de estos. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados (NMX-AA-079-1986).

5.2.5 Nitritos

El nitrito se encuentra en etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno, este puede estar presente en el agua como resultado de la descomposición biológica de materiales con alto nivel proteínico. En aguas superficiales crudas, las huellas de nitritos indican contaminación. También se puede producir el nitrito en las plantas de tratamiento o en los sistemas de distribución de agua, como resultado de la acción de bacterias sobre el nitrógeno amoniacal.

El nitrógeno de nitritos rara vez aparece en concentraciones mayores a 1 mg/L aún en efluentes de plantas de tratamiento municipales. Su concentración en aguas superficiales y subterráneas es normalmente más baja de 0,1 mg/L. Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, el monitoreo y control es muy importante en las descargas de agua (NMX-AA-099-1987).

5.2.6 Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal es el resultado de la primera transformación del nitrógeno orgánico. Esta forma del nitrógeno es soluble en agua y queda retenido por el poder absorbente del suelo. Es una forma transitoria, que se transforma en nitrógeno nítrico.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al tomar en cuenta como parte fundamental de este trabajo el arranque de un sistema experimental integrando un filtro de pulimento en las instalaciones del CIBAC, y ya que los objetivos están enfocados a estas etapas del proyecto en total, los resultados que se obtuvieron y que en este trabajo se presentan están dirigidos a ellas.

En este capítulo se muestran los resultados y valores de forma gráfica obtenidos en el desarrollo de las actividades fundamentales de este trabajo, en especial los referidos al arranque y operaciones del sistema, ya que se determinaron los problemas operativos y se corrigieron para evitar problemas.

Al mismo tiempo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los parámetros citados en el subtema 5.2 de este trabajo. Los datos colectados permiten conocer el comportamiento de las diferentes etapas del sistema y de manera global.

Para saber la eficiencia del sistema experimental fue necesario llevar a cabo una prueba estadística que permitiera ver de un enfoque distinto las transformaciones y las características del agua residual a tratar mediante una comparación entre los influentes y efluentes del sistema experimental; esto, aunado a gráficas que apoyarán la interpretación de los resultados finales. Los resultados de esta prueba estadística se reportan en el ANEXO de este trabajo.

6.1 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos

El análisis estadístico que se llevo a cabo fue una prueba de "Distribución t de (Marcello y Kimberlee, 2001).

Elección y justificación de la prueba estadística **T de Student** para pruebas relacionadas.

- a. Las mediciones son cuantitativas con variables continuas y una escala de intervalo.

- b. El número de observaciones $N=12$
- c. Una (variable directa) VD numérica: valores de 9 parámetros medidos en un sistema experimental
- d. Una (variable indirecta) VI con 2 niveles: antes y después del tratamiento
- e. Dos muestras relacionadas: el influente y efluente evaluados en dos momentos diferentes.

Planteamiento de la hipótesis.

- Hipótesis nula (H_0). No existen cambios significativos en la calidad del influente y efluentes del sistema experimental. $H_0: X_1 \geq X_2, X_3$
- Hipótesis alterna (H_a). La concentración de cada uno de los contaminantes medidos disminuye después de pasar por el tren de tratamiento de un sistema experimental, existiendo diferencias significativas en las concentraciones del influente y efluentes. $H_a: X_1 < X_2, X_3$.

Nivel de significación.

Para todo valor de probabilidad mayor que 0.05, se acepta H_a y se rechaza H_0 .
 $\alpha = 0.05$

Zona de rechazo.

Para todo valor de probabilidad mayor que 0.05, se acepta H_0 y se rechaza H_a .

- a. Si $t_0 \geq t$ se rechaza H_0 .
- b.

En los parámetros de campo como: Temperatura, pH, SS y conductividad eléctrica no aplica dicha prueba pero se integraran en los resultados de forma grafica.

Para las pruebas de laboratorio se tomaron muestras puntuales en zonas en las cuales se observó ciertas ventajas y los criterios para obtenerlas fueron los siguientes: fácil acceso, rapidez y representatividad en el tren del proceso depurativo. Es de suma

importancia mencionar que no en todos los parámetros fue necesario tomar el mismo número de muestras. Las zonas de muestreo son el canal mismo de Cuemanco (zona 1), el Filtro de paso (zona 2), la Superficie del Lecho (zona 3), la Salida del Humedal Artificial (zona 4) y la salida del filtro de pulimento (zona 5)

6.2 Resultados operativos

Al principio de la etapa de arranque, se presentaron problemas en términos de operatividad provocando contratiempos y perturbando la continuidad en la operación del sistema, por tales razones, se comenzaron a planear estrategias correctivas en cada una de las fallas presentes en el tren de tratamiento.

Las muestras fueron tomadas mensualmente, a partir de abril del 2007 y hasta junio del 2008. El mayor de los problemas que se sucedieron, fue el que se presentó alrededor del onceavo y treceavo mes. En este periodo, se produjeron problemas del tipo laboral por parte del personal de las instalaciones del CIBAC. Por tales motivos que no se discutirán en este trabajo, fue imposible ingresar a las instalaciones como normalmente se venía haciendo para hacer funcionar el sistema y llevar a cabo las actividades de muestreo, por lo que las operaciones del sistema fueron interrumpidas de forma brusca en su totalidad.

El análisis acerca del comportamiento y tiempo de recuperación del sistema se discutirá con mayor profundidad en las conclusiones de este trabajo.

En cuanto a los problemas suscitados en el sistema, se presentó dificultad en la identificación del cableado eléctrico de las bombas, por lo que se determinó cambiar el cable, identificarlo y construir registros localizados en diferentes partes del área que comprende el sistema experimental.

Dentro del periodo de construcción, también se presentaron problemas en la tubería de cableado eléctrico el cual abastece las bombas. Esta instalación se cambió por tubo flexible desde la toma de la energía eléctrica hasta los diferentes registros construidos para evitar un corto circuito en las líneas eléctricas.

En cuanto al tanque de sedimentación, este presentó problemas con la base que lo soportaba, provocando una momentánea deformación y posible ruptura de no haber sido atendido el problema. Esto llevó a que se reforzara y completara la sección de la base del tanque.

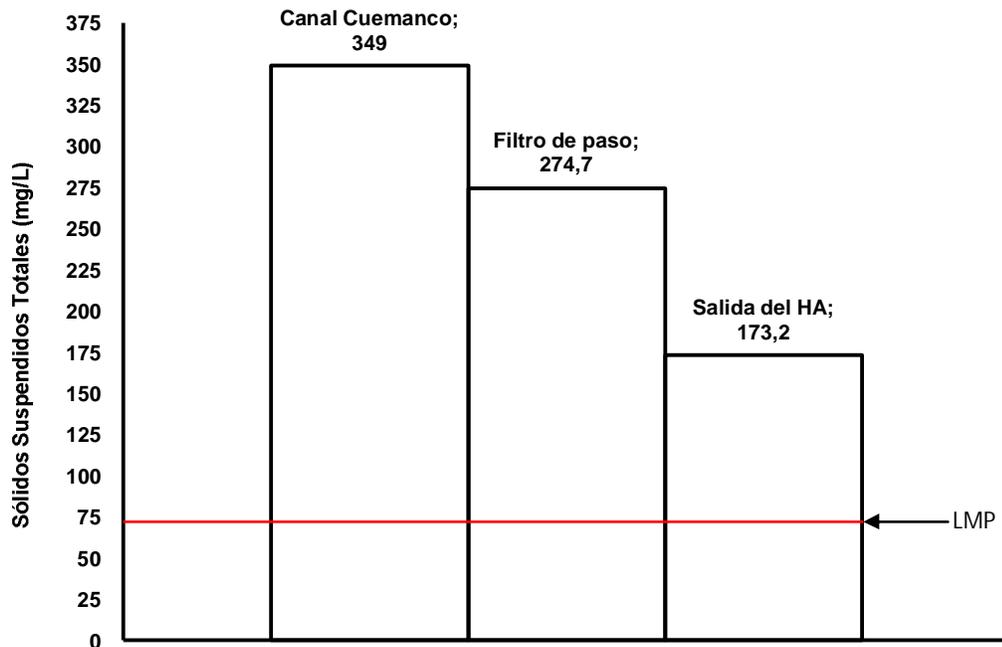
Se acondicionó una válvula en el tanque sedimentador que permitiera la recolección de sólidos y facilitara las actividades de mantenimiento. Asimismo, se colocó un indicador de nivel de llenado del tanque que permitió determinar el volumen existente.

A pesar de la existencia de interrupciones en el suministro de agua a tratar previsto para ser alimentado al sistema experimental, no se detectaron afectaciones funcionales relevantes.

El funcionamiento adecuado del sistema ha permitido la obtención de agua de buena calidad para actividades de riego agrícola y uso en estanques acuáticos. Lo anterior gracias a la realización oportuna de las actividades de mantenimiento y revisión programadas. Si bien es recomendable contar con la presencia periódica de personal de mantenimiento, esto ocurrirá en función del diseño del sistema de tratamiento propuesto, la ubicación donde se quiera implementar y la calidad de agua que se desee tratar, así como las condiciones aledañas a su ubicación. Para este caso específico, la frecuencia requerida, en cuanto a presencia de personal de mantenimiento es de una hora y media tres veces a la semana.

6.3 Resultados de parámetros fisicoquímicos

A continuación se presentan los resultados fisicoquímicos por etapa en el tren de tratamiento.

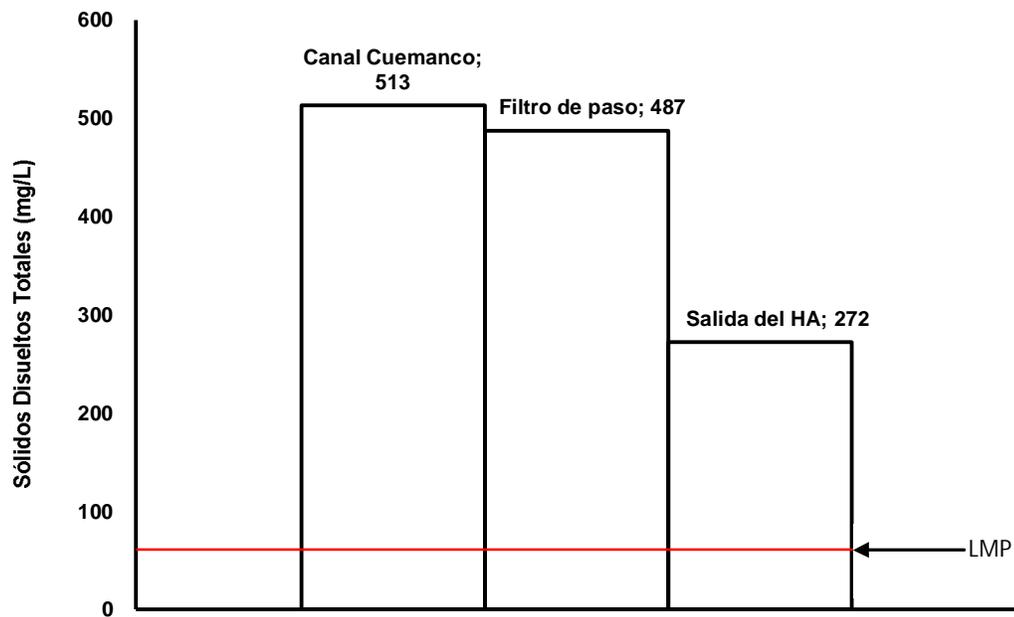


Gráfica 1. Disminución de sólidos suspendidos totales por etapa.

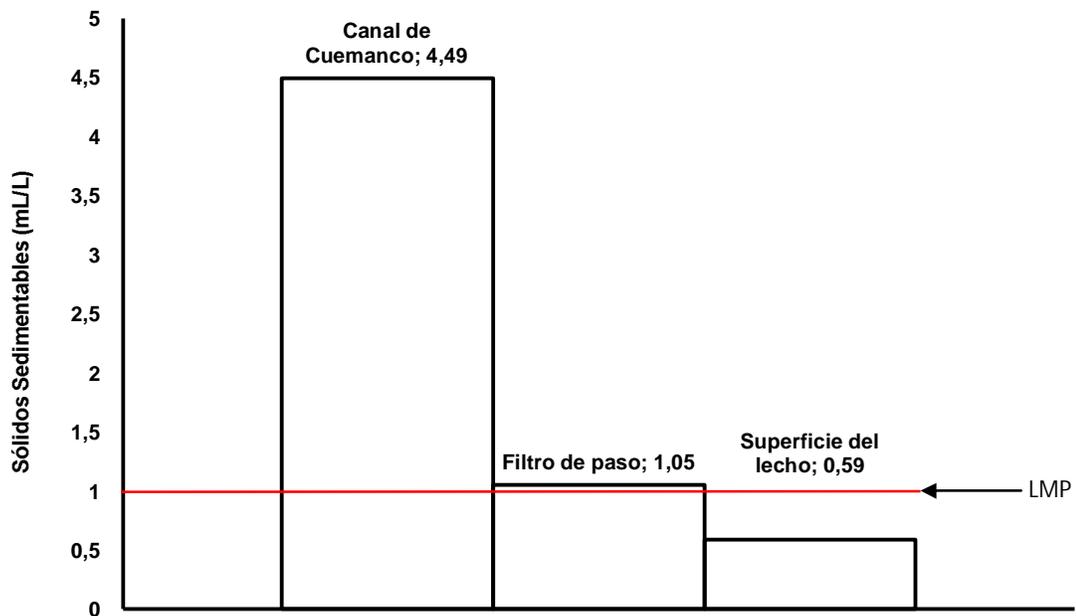
Tabla 3. Resultados de SST, SDT y Sse.

	Entrada mg/L	Salida mg/L	% de remoción	NOM-001-SEMARNAT- 1996 (LMP mg/L)
Sólidos suspendidos totales	349	173.2	49.63	75
Sólidos disueltos totales	513	272	53.02	NA
Sólidos sedimentables	4.49	0.59	13.14	1

(LMP): Límite máximo permisible



Gráfica 2. Disminución de sólidos totales por etapa.



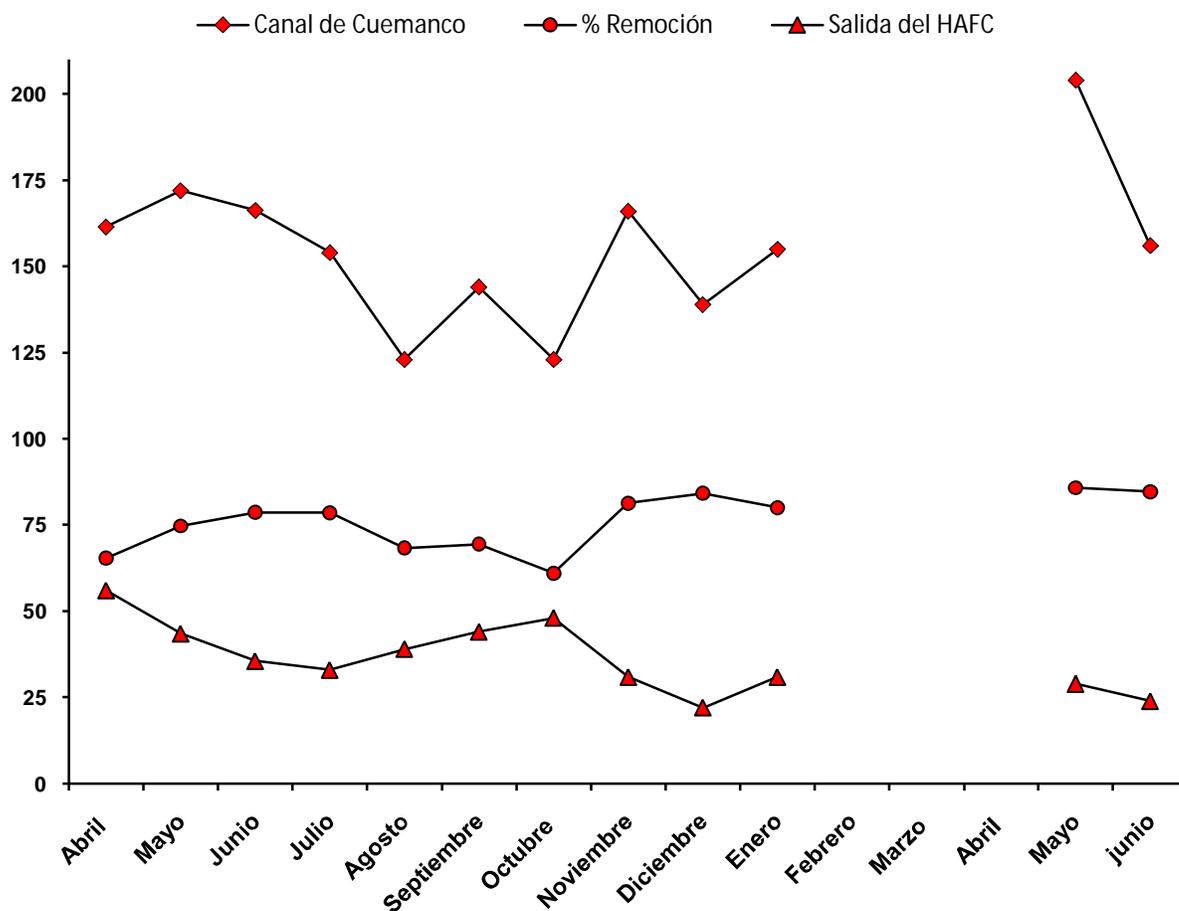
Gráfica 3. Sólidos sedimentables por etapa.

Como se observa en la Tabla 3, el valor de todos los sólidos monitoreados se encuentra por arriba del límite máximo permisible mensual con excepción de los sólidos sedimentables indicado por Norma Oficial Mexicana para uso en riego agrícola restringido (NOM 001-SEMARNAT-1996). Esto es debido a que los procesos que se dan en la retención de sólidos se encuentran en un periodo de adaptación, es necesario dejar que transcurra el tiempo para que en el interior del lecho filtrante se forme una biopelícula generada por la presencia de oxígeno y microorganismos y estos a su vez consuman mayor cantidad de sólidos orgánicos y así reduzcan los niveles de sólidos.

En este sentido, los sólidos irán disminuyendo conforme la biopelícula se vaya formando en las paredes del soporte que conforma el lecho filtrante, este proceso lleva un tiempo de aproximadamente doce meses el cual dependerá de la cantidad de materia orgánica del agua a tratar y las condiciones de operación del sistema.

Los resultados en los parámetros de campo como la temperatura, pH y conductividad eléctrica se reportan en el ANEXO de este trabajo. Cabe mencionar que estos parámetros no presentaron cambios notables o bruscos que hayan interferido en el tratamiento del agua proveniente del canal de Cuemanco.

6.4 Resultados de parámetros biológicos

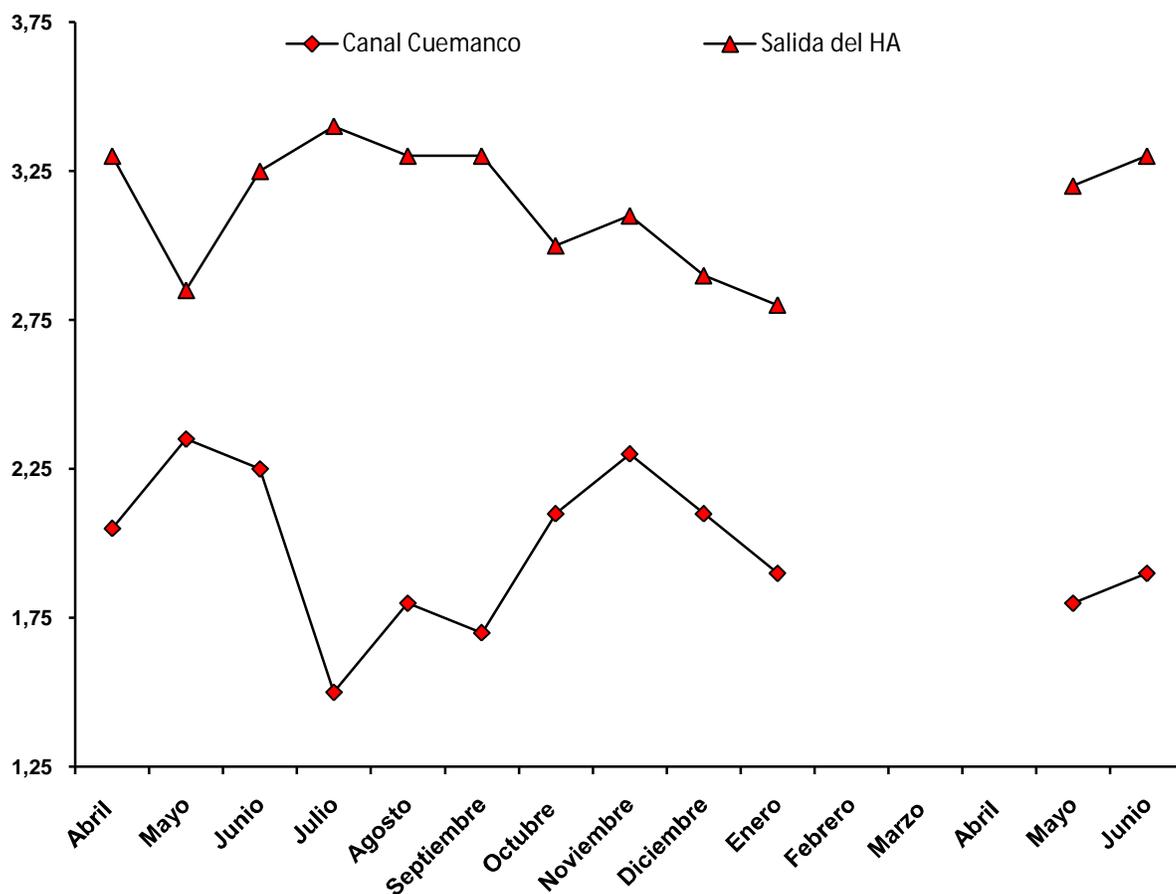


Gráfica 4. Demanda química de oxígeno.

Para la demanda química de oxígeno se observa un decremento significativo en la materia orgánica comparado con la entrada del canal de Cuemanco obteniendo hasta un 85 % de remoción de material carbonoso.

Los meses de agosto septiembre y octubre presentan menor concentración de materia orgánica, esto es debido a que la temporada de lluvia ocasiona la dilución de contaminantes en el agua del canal de Cuemanco.

Autores como, Kadlec (2008), indican que los HA, como sistemas de tratamiento biológico remueven compuestos de carbono y sólidos suspendidos con eficiencias comúnmente superiores al 80 %.

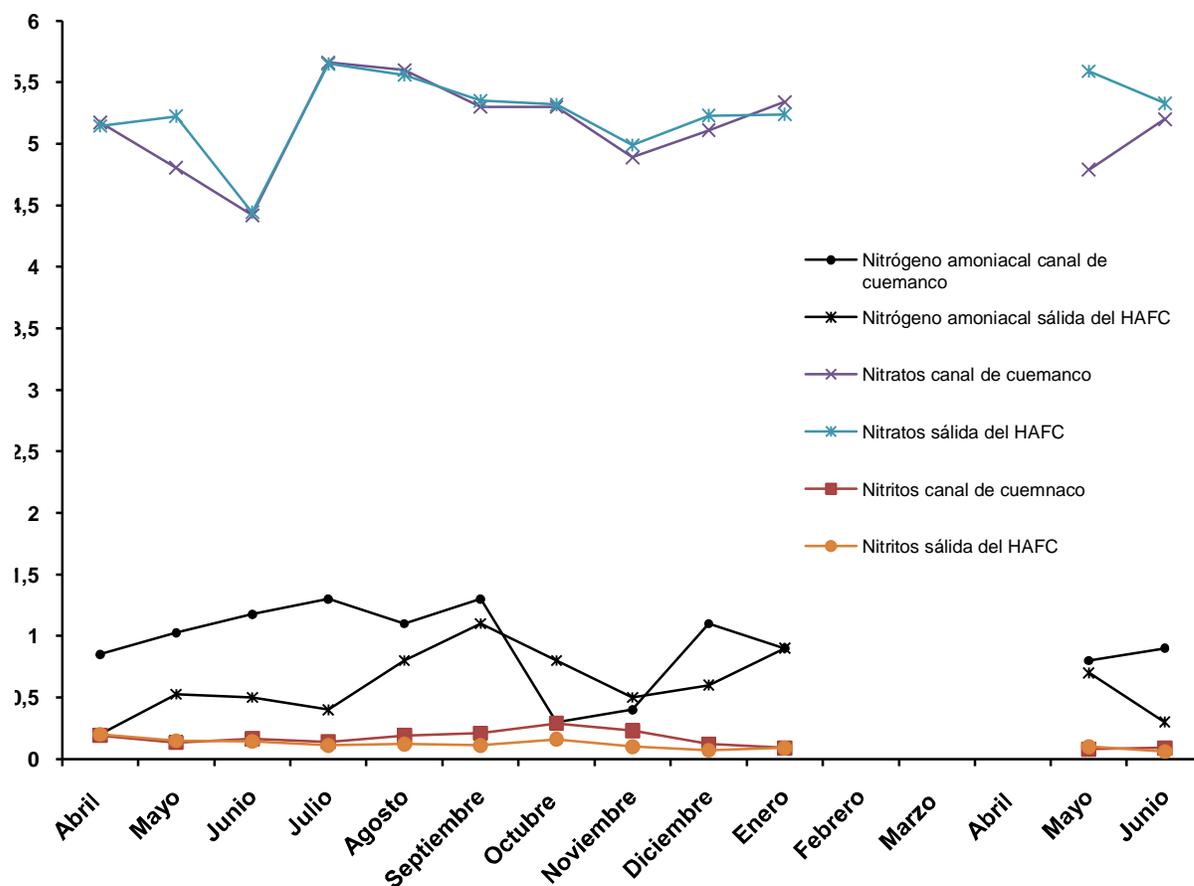


Gráfica 5. Oxígeno disuelto.

En las concentraciones del oxígeno disuelto (Gráfica 5), determinadas en el canal de Cuemanco se ubican en un intervalo de entre 1.5 y 2.35 mg/L, en la zona de muestreo de la superficie del lecho se eleva hasta 6.68 mg/L. Esto es el resultado de la aireación del agua al ingresarla mediante la microaspersión, sin embargo a la salida del sistema experimental presenta valores por debajo de los 3.25 mg/L a consecuencia de la actividad microbiana en zonas aerobias del lecho filtrante.

Esto lleva a pensar que las condiciones del agua tratada en términos de la cantidad de oxígeno disuelto no son excelentes, pero sí aceptables para el uso de esta calidad de agua en procesos reproductivos y de investigación de especies de la zona, así como para uso de riego restringido.

En otro sentido, Truu (2009), señala que la existencia de ambientes con diferentes concentraciones de oxígeno permite que se desarrolle una gran variedad de microorganismos capaces de transformar los materiales orgánicos hasta biodegradarlos a compuestos más simples y así, tratarlos de forma diferente para su extracción del sistema de tratamiento.



Gráfica 6. Perfil de nitrificación.

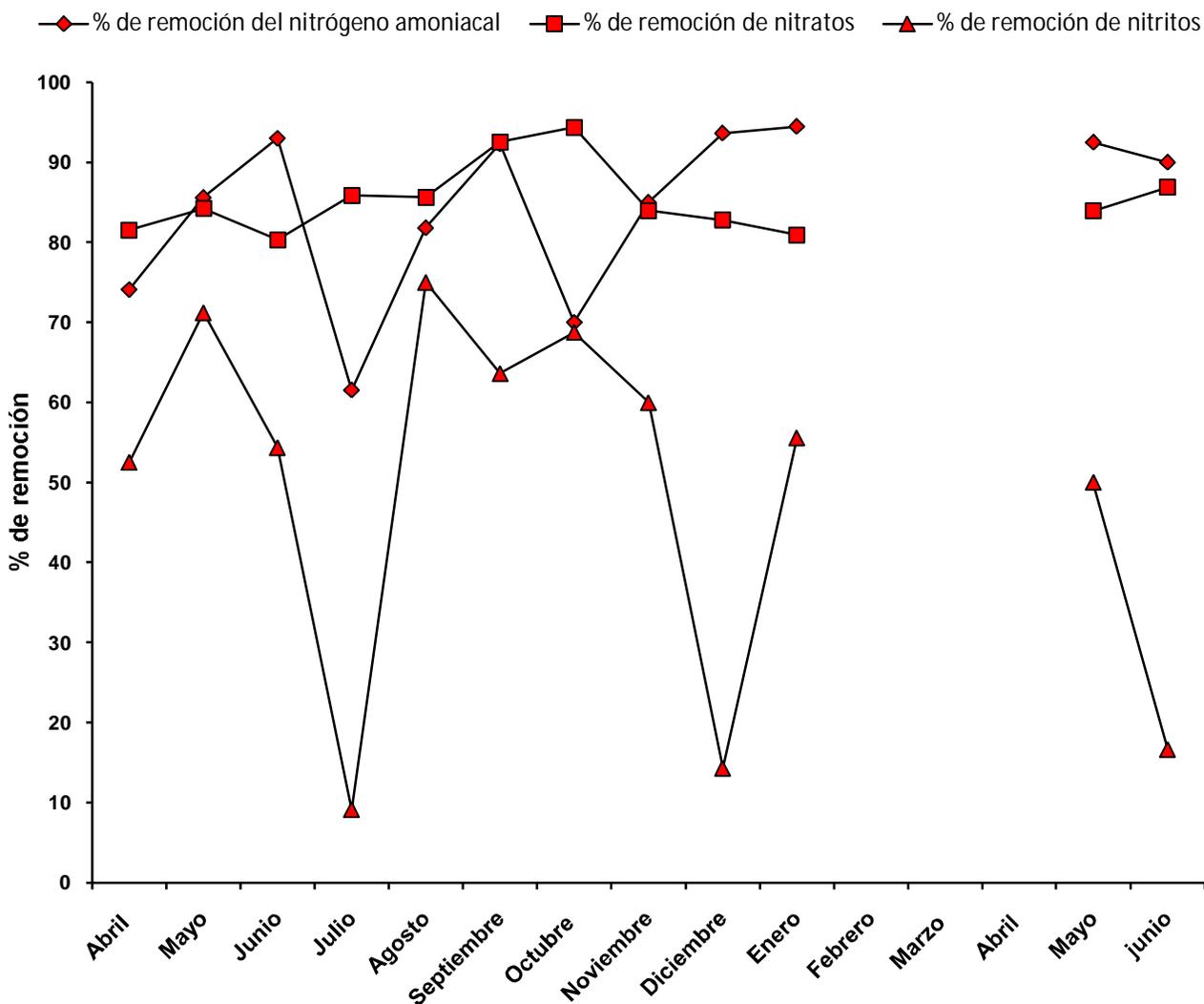
En el Gráfica 6, se presentan las concentraciones del nitrógeno amoniacal, Nitratos y Nitritos en el influente (canal de Cuemanco) y efluente (salida del sistema experimental agua tipo A).

Los valores en las concentraciones del nitrógeno amoniacal entre el influente y efluente presentan cambios significativos. Como se puede observar, en la Gráfica 6, los registros en las concentraciones de nitrógeno amoniacal muestran que alrededor de los meses de octubre y diciembre dichas concentraciones disminuyen por debajo de los valores del influente; esto puede ser ocasionado a las condiciones climatológicas que prevalecen en la zona y a la dilución del agua del canal de Cuemanco debido a la precipitación.

Los valores registrados en las concentraciones de nitratos se ven por encima del nitrógeno amoniacal y los nitritos tanto para el influente y efluente (Gráfica 6). En estas dos series de valores no se observan cambios significativos. Esto es debido a la falta de adaptación en los componentes del sistema experimental; sin embargo, a medida que el sistema se vaya adaptando a las condiciones de operación se verán gradualmente cambios en las concentraciones de los contaminantes.

Por su parte, los nitritos presentan valores muy por debajo del nitrógeno amoniacal y los nitratos con un comportamiento similar entre el influente y efluente. Sin duda se deben a los mismos factores mencionados con anterioridad para los nitratos.

Es importante mencionar que la Gráfica 6 representa los resultados registrados para las concentraciones de compuestos del nitrógeno de la primera etapa en el tratamiento del sistema experimental, es decir agua tipo A.



Gráfica 7. Porcentajes de remoción en la nitrificación.

En general, en términos de la Gráfica 6 y observando la Gráfica 7, referida a los valores en las concentraciones de los parámetros del nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos se presentan los siguientes resultados.

En cuanto a los nitritos, las concentraciones son bajas, presentando valores inferiores a 0.29 mg/L a la entrada del sistema y 0.16 mg/L a la salida, esto en la primera etapa de tratamiento. En general los porcentajes de remoción se ubican en su mayoría en valores por encima del 50% (ver ANEXO). En este caso, se puede afirmar que la vegetación absorbe principalmente las sustancias nutritivas disueltas en el agua como lo son compuestos nitrogenados, para integrarlos en su biomasa. Adicionalmente,

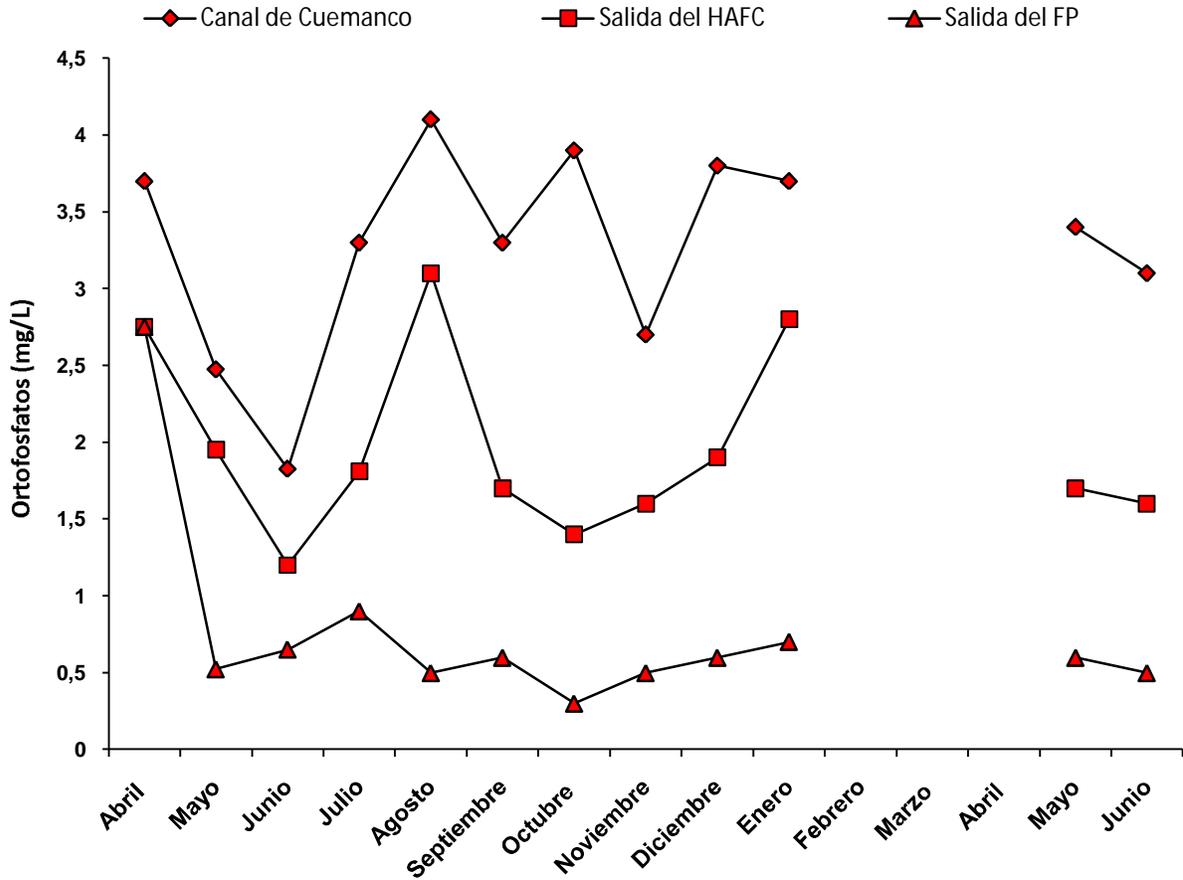
se cuenta con la presencia de una comunidad de microorganismos, que se adhieren a la superficie del material de empaque, llevando a cabo la mayor remoción de los contaminantes al metabolizarlos (Cereceda, 2000, Aburto Castañeda, 2009).

Asimismo, es importante mencionar que el material de empaque utilizado en este sistema experimental, además de servir como soporte para el desarrollo de las plantas y la formación de una biopelícula, la cual está constituida por microorganismos que asociados a la degradación de los distintos contaminantes que se encuentran en el agua residual, permiten la interacción de estos componentes y permite la transformación microbiana del nitrógeno amoniacal a nitratos, los cuales a su vez son incorporados, para su desarrollo, por las plantas vasculares (Aburto Castañeda, 2009).

En conclusión, se puede afirmar que los principales mecanismos de remoción de compuestos nitrogenados, en orden de importancia, son la nitrificación, seguida de la desnitrificación microbiológica, la adsorción-fijación por parte de las plantas y la volatilización del nitrógeno amoniacal hacia la atmósfera (Vimazal, 2009; Wood, 1995). En principio, los contenidos de nitrógeno en el agua residual son oxidados microbiológicamente tanto en condiciones aerobias como anóxicas, convirtiéndose a nitrógeno amoniacal a este proceso se le denomina mineralización:



Posteriormente, el NH_4^+ es eliminado por diferentes medios: fijación como biomasa en las plantas, absorción física del suelo y volatilización atmosférica. En relación con la conversión del amonio a gas amoníaco (NH_3) y su posterior volatilización, esta sólo es posible si existen condiciones estables de pH (7.5-8.6 unidades) (Drizo y Frost, 1996, Aburto Castañeda, 2009).



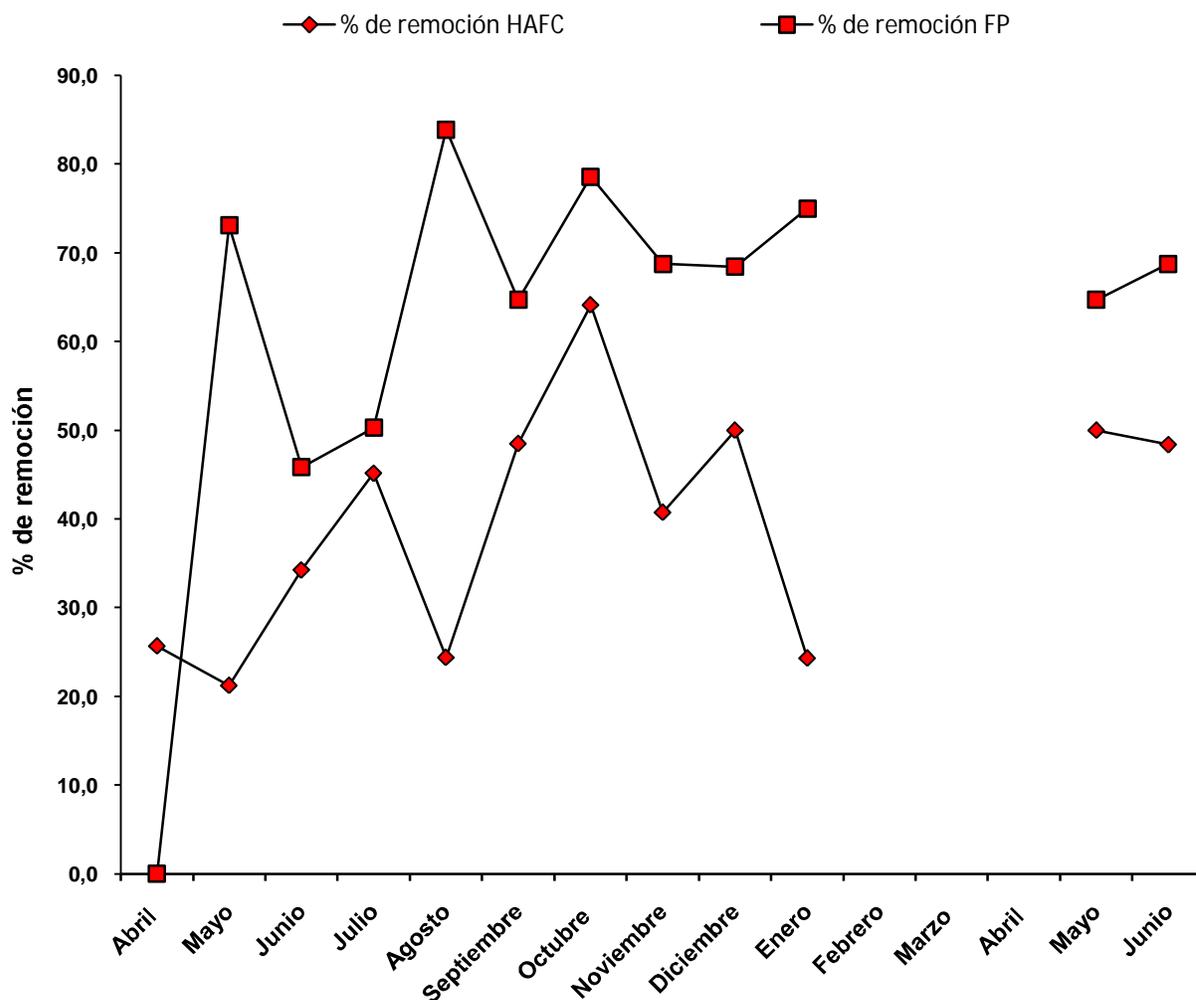
Gráfica 8. Ortofosfatos.

En la Gráfica 8. Ortofosfatos, se integran tres grupos de resultados en la concentración de ortofosfatos: los provenientes de las tomas de influente (canal de Cuemanco), los resultantes del tratamiento del lecho filtrante (agua tipo A, efluente y a su vez influente del filtro de pulimento) y por último, el efluente del filtro de pulimento (agua tipo B).

Los niveles en la concentración disminuyen conforme avanza la etapa en el proceso depurativo del sistema experimental. De la misma forma, el sistema tiende a mostrar cierta estabilización en cierto rango de concentración incluso en el tiempo posterior al paro del sistema.

En términos de normatividad, los intervalos en la concentración de nutrientes como lo son los ortofosfatos se ubican por debajo de la NOM-001-SEMARNAT-1996

que indica un límite máximo permisible de 20 mg/L medido como fósforo total para embalses naturales y artificiales, de uso de riego agrícola.



Gráfica 9. Porcentaje de remoción de ortofosfatos.

En la Gráfica 9 se observa los porcentajes de remoción de ortofosfatos utilizando como influente el agua tipo A que es la saliente del lecho filtrante del sistema y obteniendo una calidad de agua tipo B del filtro de pulimento encontrando hasta un 85 % de remoción en los ortofosfatos. El comportamiento de las gráficas nos indica una tendencia poco uniforme, esto es debido a que el sistema se encuentra en la etapa experimental, lo cual tiende a sufrir modificaciones en el funcionamiento.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se conceptualizó un sistema experimental de tratamiento basado en humedales artificiales. El arreglo consiste en un sedimentador, un humedal artificial de flujo combinado (HAFC), con opción a un filtro de pulimento. A partir de este sistema se pudieron obtener dos calidades diferentes de agua. Una, sin pasar por el filtro de pulimento, para el riego de cultivos hidropónicos y otra después de dicho filtro, la cual era con disminución en el contenido de nitrógeno y fósforo, susceptible de ser empleada para protección de vida acuática silvestre.

De manera particular, el arreglo estructural del sistema experimental, seguido de un filtro de pulimento permitió la evaluación y un desempeño depurativo durante su etapa de arranque y adaptación, así como resultados favorables con buenas expectativas. Los porcentajes de remoción promedio fueron de 76%, 86% y 80% para los parámetros DQO, N-NH₄ y PO₄³⁻, respectivamente. Algunos de los resultados obtenidos, evidencian que la calidad del agua tratada está dentro de los límites máximos permisibles indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996, así como con respecto a los establecidos a nivel internacional, relativos a la calidad del agua para su uso en la acuicultura. La alimentación del agua por lotes y su microaspersión controlada, permitieron que existiera en el lecho una mayor concentración de oxígeno disuelto, lo cual favoreció la reducción de materia orgánica disuelta, medida como DQO, así como el aumento del proceso de nitrificación. El filtro de pulimento proporcionó agua con características favorables a la eliminación del nitrógeno contenido en el agua tratada, nitrificando en la parte superior y desnitrificando en la parte inferior.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que conforme transcurra un mayor tiempo de operación del sistema, dentro de su tiempo de vida útil estimado en 25 años, los porcentajes de remoción de contaminantes se incrementarán. Lo anterior, derivado de un aumento en la densidad de la zona radicular y del mayor establecimiento de la biopelícula adherida al medio de soporte.

Recomendaciones

- Realizar un programa de ingreso de equipo de buena calidad y acorde a los requerimientos necesarios que permitan garantizar el óptimo funcionamiento del sistema.

Reubicar los equipos y sistemas de control, a un sitio más amplio, libre de humedad o de sol, que permita para brindar condiciones adecuadas para su funcionamiento, previniendo así averías en los sistemas electrónicos que controlan la alimentación automática del sistema.

- Realizar el adecuado manejo y disposición, vía compostaje, del los subproductos generados por el sistema experimental para evitar la acumulación de sedimentos, y de la biomasa generada a consecuencia de la poda.

Definir el programa de mantenimiento del filtro de pulimento. Que permita garantizar una calidad de agua superior a la obtenida a lo largo del presente trabajo.

Anexo

Resultados analíticos

Todos los resultados se encuentran en unidades de mg/L excepto cuando se especifique.

Tabla 4. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de SST.

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado	
			Filtro de paso	Efluente del lecho filtrante
1	Abril	367,5	408,5	417,5
2	Mayo	358,0	368,5	205,5
3	Junio	351,2	325,0	142,7
4	Julio	310,0	234,0	114,0
5	Agosto	324,0	221,0	94,0
6	Septiembre	405,0	231,0	112,0
7	Octubre	310,0	202,0	101,0
8	Noviembre	423,0	231,0	89,0
9	Diciembre	314,0	234,0	124,0
10	Enero	401,0	266,0	156,0
11	Febrero	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA
14	Mayo	344,0	212,0	148,0
15	Junio	234,0	205,0	124,0

Tabla 5. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de SDT.

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado	
			Filtro de paso	Efluente del lecho filtrante
1	Abril	456,5	456,5	453,0
2	Mayo	498,2	498,2	437,7
3	Junio	552,5	552,5	480,7
4	Julio	601,0	502,0	210,0
5	Agosto	633,0	514,0	203,0
6	Septiembre	588,0	555,0	198,0
7	Octubre	505,0	661,0	201,0
8	Noviembre	422,0	767,0	204,0
9	Diciembre	566,0	623,0	224,0
10	Enero	398,0	453,0	156,0
11	Febrero	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA
14	Mayo	404,0	355,0	199,0
15	Junio	498,0	423,0	228,0

Tabla 6. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de temperatura (°C).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado	
			Filtro de paso	Efluente del lecho filtrante
1	Abril	20,8	23,0	19,9
2	Mayo	20,8	20,1	19,2
3	Junio	20,9	20,9	19,0
4	Julio	22,1	22,1	20,0
5	Agosto	21,8	20,1	21,0
6	Septiembre	20,1	20,1	20,0
7	Octubre	16,4	18,1	19,2
8	Noviembre	21,3	19,2	20,1
9	Diciembre	19,3	19,4	19,9
10	Enero	20,3	20,1	20,3
11	Febrero	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA
14	Mayo	21,4	22,1	20,1
15	Junio	20,9	20,4	21,1

Tabla 7. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de conductividad eléctrica (μs).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado	
			Filtro de paso	Efluente del lecho filtrante
1	Abril	926	950	710
2	Mayo	858	814	689
3	Junio	864	818	796
4	Julio	882	861	715
5	Agosto	881	910	805
6	Septiembre	815	850	812
7	Octubre	892	812	789
8	Noviembre	825	845	841
9	Diciembre	921	789	812
10	Enero	812	810	652
11	Febrero	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA
14	Mayo	904	749	712
15	Junio	740	899	789

Tabla 8. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de pH (unidades de pH).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado
			Efluente del lecho filtrante
1	Abril	9,8	8,3
2	Mayo	9,2	8,2
3	Junio	9,7	8,1
4	Julio	9,2	8,8
5	Agosto	8,8	8,6
6	Septiembre	8,1	8,5
7	Octubre	9,3	8,1
8	Noviembre	9,5	8,1
9	Diciembre	9,0	8,1
10	Enero	9,1	8,6
11	Febrero	NA	NA
12	Marzo	NA	NA
13	Abril	NA	NA
14	Mayo	9,1	8,5
15	Junio	9,2	8,3

Tabla 9. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de Sse.

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Superficie del lecho filtrante	% de remoción HA
1	Abril	3,7	2,5	33,8
2	Mayo	4,7	1,2	75,0
3	Junio	5,0	1,2	75,3
4	Julio	4,1	0,6	85,4
5	Agosto	4,9	0,8	83,7
6	Septiembre	4,2	1,6	61,9
7	Octubre	4,1	0,9	78,0
8	Noviembre	4,8	0,7	85,4
9	Diciembre	4,1	0,6	85,4
10	Enero	4,7	0,9	80,9
11	Febrero	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA
14	Mayo	4,6	1,3	71,7
15	Junio	3,9	1,8	53,8

Tabla 10. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de OD.

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado		
			Filtro de paso	Superficie del lecho filtrante	Salida del HA
1	Abril	2,05	1,85	6,45	3,3
2	Mayo	2,35	1,52	6,65	2,85
3	Junio	2,25	1,32	6,67	3,25
4	Julio	1,5	0,9	6,1	3,4
5	Agosto	1,8	1,1	5,1	3,3
6	Septiembre	1,7	1,2	5,1	3,3
7	Octubre	2,1	1,8	5,6	3,0
8	Noviembre	2,3	1,9	5,2	3,1
9	Diciembre	2,1	1,8	5,8	2,9
10	Enero	1,9	1,3	6,1	2,8
11	Febrero	NA	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA	NA
14	Mayo	1,8	1,6	5,9	3,2
15	Junio	1,9	1,7	5,8	3,3

Tabla 11. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de la DQO.

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado		Filtro de pulimento	
			Filtro de paso	Superficie del lecho filtrante	Salida del HA	% de remoción
1	Abril	161,5	116,5	70	56	63,45
2	Mayo	172	124,75	60	43,5	74,175
3	Junio	166,25	121,25	57	35,5	77,525
4	Julio	154	133	61	33	78,6
5	Agosto	123	104	57	39	68,3
6	Septiembre	144	111	48	44	69,4
7	Octubre	123	104	51	48	61
8	Noviembre	166	123	34	31	81,3
9	Diciembre	139	156	56	22	84,2
10	Enero	155	134	44	31	80
11	Febrero	NA	NA	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA	NA	NA
14	Mayo	204	111	35	29	85,8
15	Junio	156	123	38	24	84,6

Tabla 12. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro del (NH₄⁺).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado		Filtro de pulimento	
			Salida del HA	% de remoción HA	Salida del FP	% de remoción FP
1	Abril	0,85	0,20	76,5	0,22	74,1
2	Mayo	1,02	0,5	48,8	0,1	85,6
3	Junio	1,17	0,5	57,4	0,1	93,0
4	Julio	1,3	0,4	69,2	0,5	61,5
5	Agosto	1,1	0,8	27,3	0,2	81,8
6	Septiembre	1,3	1,1	15,4	0,1	92,3
7	Octubre	0,3	0,8	0,0	0,1	70,0
8	Noviembre	0,4	0,5	0,0	0,1	85,0
9	Diciembre	1,1	0,6	45,5	0,1	93,6
10	Enero	0,9	0,9	0,0	0,1	94,4
11	Febrero	NA	NA	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA	NA	NA
14	Mayo	0,8	0,7	12,5	0,06	92,5
15	Junio	0,9	0,3	66,7	0,09	90,0

Tabla 13. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de (NO₂⁻).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado		Filtro de pulimento	
			Salida del HA	% de remoción HA	Salida del FP	% de remoción FP
1	Abril	0,19	0,20	5,26	0,10	52,5
2	Mayo	0,13	0,15	11,32	0,04	71,2
3	Junio	0,17	0,14	13,64	0,07	54,4
4	Julio	0,14	0,11	21,43	0,10	9,1
5	Agosto	0,19	0,12	36,84	0,03	75,0
6	Septiembre	0,21	0,11	47,62	0,04	63,6
7	Octubre	0,29	0,16	44,83	0,05	68,8
8	Noviembre	0,23	0,10	56,52	0,04	60,0
9	Diciembre	0,12	0,07	41,67	0,06	14,3
10	Enero	0,09	0,09	0	0,04	55,6
11	Febrero	NA	NA	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA	NA	NA

14	Mayo	0,08	0,10	25,00	0,05	50,0
15	Junio	0,09	0,06	33,33	0,05	16,7

Tabla 14. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de (NO_3^-).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado		Filtro de pulimento	
			Salida del HA	% de remoción HA	Salida del FP	% de remoción FP
1	Abril	5,18	5,15	0,6	1,0	81,5
2	Mayo	4,81	5,23	-8,7	0,8	84,2
3	Junio	4,42	4,44	-0,5	0,9	80,3
4	Julio	5,66	5,65	0,2	0,8	85,8
5	Agosto	5,60	5,56	0,7	0,8	85,6
6	Septiembre	5,30	5,35	-0,9	0,4	92,5
7	Octubre	5,30	5,32	-0,4	0,3	94,4
8	Noviembre	4,89	4,99	-2,0	0,8	84,0
9	Diciembre	5,11	5,23	-2,3	0,9	82,8
10	Enero	5,34	5,24	1,9	1,0	80,9
11	Febrero	NA	NA	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA	NA	NA
14	Mayo	4,79	5,59	-16,7	0,9	83,9
15	Junio	5,2	5,33	-2,5	0,7	86,9

Tabla 15. Relación de muestras tomadas en el periodo de evaluación del sistema experimental para el parámetro de (PO_4^{3-}).

No. Muestra	Mes	Canal de Cuemanco	Humedal artificial de flujo combinado		Filtro de pulimento	
			Salida del HA	% de remoción HA	Salida del FP	% de remoción FP
1	Abril	3,7	2,75	25,7	2,75	0,0
2	Mayo	2,47	1,95	21,2	0,525	73,1
3	Junio	1,82	1,2	34,2	0,65	45,8
4	Julio	3,3	1,81	45,2	0,9	50,3
5	Agosto	4,1	3,1	24,4	0,5	83,9
6	Septiembre	3,3	1,7	48,5	0,6	64,7
7	Octubre	3,9	1,4	64,1	0,3	78,6
8	Noviembre	2,7	1,6	40,7	0,5	68,8
9	Diciembre	3,8	1,9	50,0	0,6	68,4
10	Enero	3,7	2,8	24,3	0,7	75,0
11	Febrero	NA	NA	NA	NA	NA
12	Marzo	NA	NA	NA	NA	NA
13	Abril	NA	NA	NA	NA	NA
14	Mayo	3,4	1,7	50,0	0,6	64,7
15	Junio	3,1	1,6	48,4	0,5	68,7

Resultados estadísticos de la prueba de “t de Student”.

Esta prueba solo aplica para sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos sedimentables (Sse), oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y ortofosfatos debido a la importancia de los resultados. Los resultados en los parámetros de temperatura, conductividad eléctrica y pH se reportan en:

Tabla 16. Resultados estadísticos.

	d	σ	t	α	gl	to	tt
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	4,36	96,50	0,16	0.05	11	6,44	1,769
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	243,97	142,24	5,94	0.05	11	4,89	1,76p
Sólidos Sedimentables (Sse)	3,225	3,355	3,33	0.05	11	10,76	NA
Oxígeno Disuelto (OD)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	118,97	25,04	16,46	0.05	11	16,46	1,796
Nitrógeno Amoniacal	0,79	0,81	3,37	0.05	11	3,37	1,769
Nitritos	0,105	0,09	4,13	0.05	11	4,13	1,769
Nitratos	4,36	0,44	34,45	0.05	11	34,45	1,769
Ortofosfatos	2,51	0,81	10,76	0.05	11	10,76	1,769

Donde:

d= diferencia entre el influente y efluente deseados

σ = desviación estándar

t= valor estadístico de procedimiento

= valor de probabilidad

gl= grados de libertad

to= valor de prueba

tt= valor calculado u obtenido (de tablas)

Según los resultados obtenidos de la Tabla 16, se observa que los valores de prueba están por encima del valor obtenido de tablas con 11 grados de libertad y un valor de probabilidad de 0.05. Por lo tanto, si se aplican las premisas de las hipótesis mencionadas en el subcapítulo 6.1 de manera resumida presentadas en este trabajo se constatará que:

- La hipótesis alterna (H_a).....los contaminantes disminuyen. $H_a: X_1 < X_2$.
- La hipótesis nula (H_0).....los contaminantes no disminuyen. $H_0: X_1 \geq X_2$.

Si la $t_o \geq t_t$ se rechaza H_0

Si la $p(t_o) \leq \alpha$, se rechaza H_0

Decisión:

Como t_o es superior al valor de 1.769 con 11 grados de libertad tiene un valor de probabilidad menor que 0.05, entonces se acepta H_a y se rechaza H_0 .

$t_o > t_t$ se rechaza H_0 . Hay una reducción en los niveles de contaminantes en 12 muestras tomadas para diferentes contaminantes durante el tiempo de prueba del sistema para fines del presente trabajo, después de haber pasado por el humedal artificial de flujo combinado.

Interpretación:

Los niveles en la concentración de contaminantes disminuyen después de haber pasado a través de un sistema de tratamiento de aguas residuales conocido como humedales artificiales, existiendo diferencias significativas entre las concentraciones determinadas antes y después del tratamiento.

Figura 14. Vista aérea del humedal artificial de flujo combinado

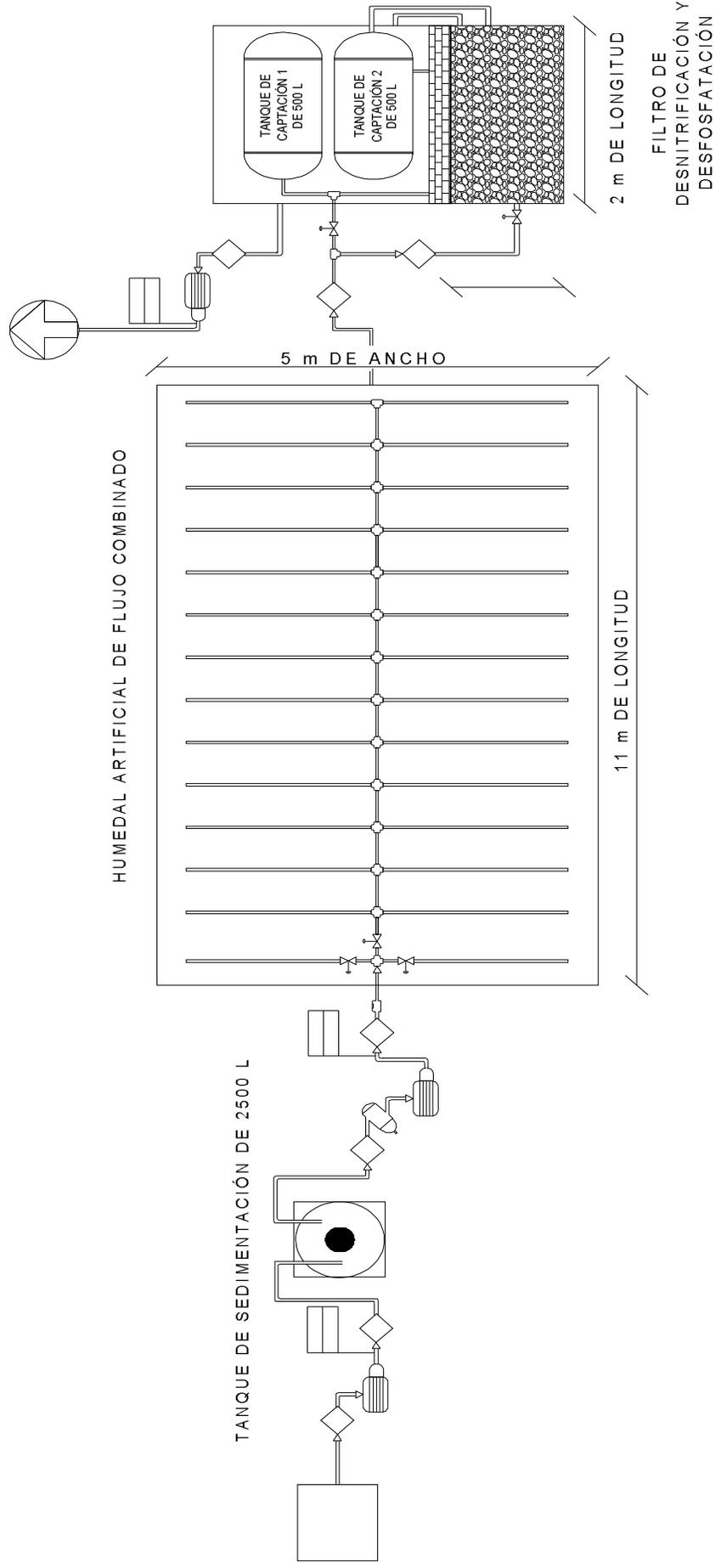
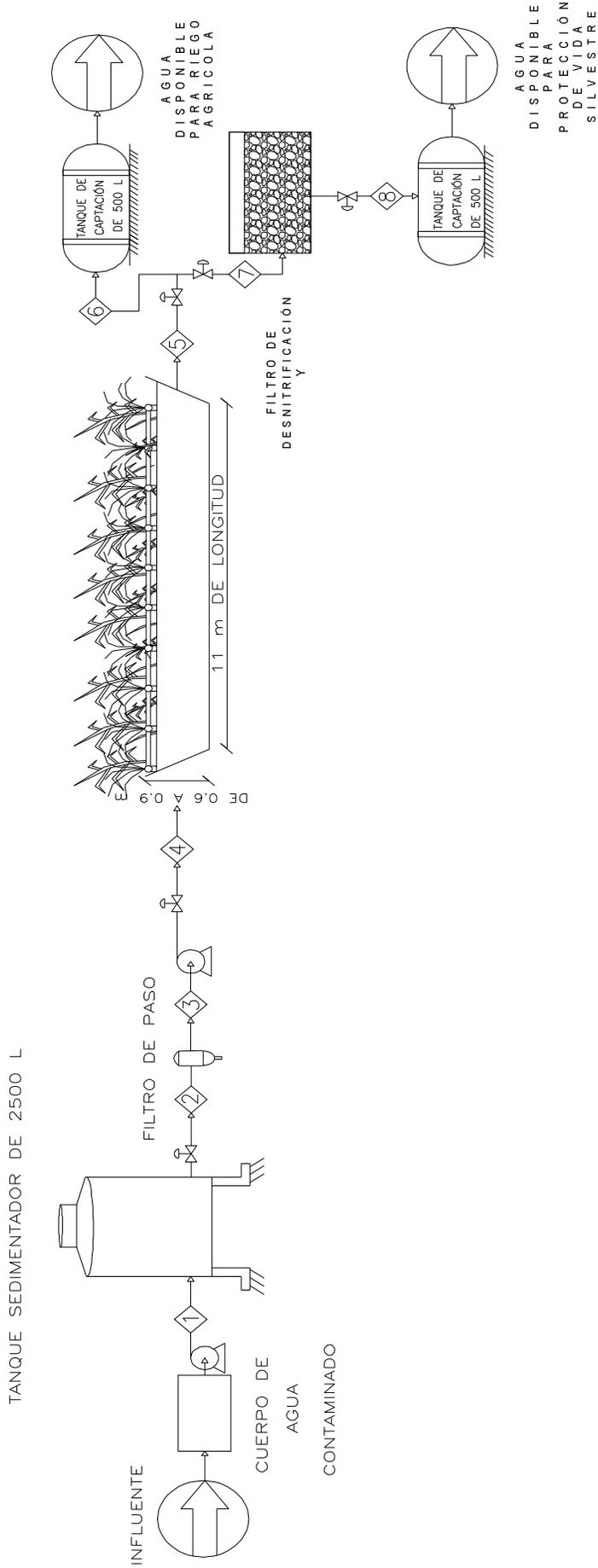


Figura 15. Vista frontal del humedal artificial de flujo combinado



Balance global teórico de agua

Para el balance se tomaron bases de cálculo que se reportan en la bibliografía y en trabajos de pruebas de campo. Las bases de cálculo son: la evapotranspiración que es de aproximadamente $15 \text{ L/m}^2 \text{ día}$ y el aporte por la precipitación media anual de entre 700 y 900 mm $\text{H}_2\text{O/año}$ (González Rendón, 2006).

$$\text{Evapotranspiración media} = 15 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}} \rightarrow \text{Área} = 55 \text{m}^2 \rightarrow 825 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

$$825 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}} = 0.83 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

$$\text{entrada}_{\text{mínima}} = 4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \rightarrow \text{sálida} 3.17 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

$$\text{entrada}_{\text{media}} = 5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \rightarrow \text{sálida} 4.17 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

$$\text{entrada}_{\text{máxima}} = 6 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \rightarrow \text{sálida} 5.17 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

Si se considera que la temporada de lluvias abarca los meses de junio, julio, agosto, septiembre y una parte de octubre (aproximadamente 153 días de lluvia al año). Con base a estos datos se obtiene que el aporte de lluvia medio anual en la superficie del HA es de:

$$\text{Aporte por lluvia medio anual} = \frac{\left(2.19 \frac{\text{mH}_2\text{O}}{\text{día}} * 55 \text{m}^2\right)}{153 \frac{\text{días de lluvia}}{\text{año}}} = 0.79 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Este aporte por lluvias se le suma al valor de carga inicial en el cual se está operando el sistema.

Bibliografía

1. Aburto Castañeda S. (2009). Análisis y modelación del proceso de nitrificación en sistemas experimentales que simulan humedales artificiales. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México. (Tesis en proceso).
2. APHA. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20a ed. A. American Public Health Association. Washington, EUA. 1033 p.
3. Bojórquez C. L y Amaro E. J. (2003). Caracterización múltiple de la calidad del agua de los canales de Xochimilco. En Stephan-Otto, E. (ed.) El Agua en la Cuenca de México. Sus problemas históricos y perspectivas de solución. UAM-Xochimilco Patronato del Parque Ecológico de Xochimilco A.C. México. 1:281-302 p.
4. Brix H. (1987). Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants -the root-zone method. Water. Sci. Technol., 19(1):107-118 p.
5. Brix H. (1996). Role of macrophytes in constructed wetlands. En Memories of 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Austria. 2-1 a 2-6 p.
6. Brix H., Schierup H. y Arias C. A. (2008). Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn? Water Sci Technol 56, 3: 63 68 p.
7. Browning K. y Greenway M. (2003). Nutrient removal and plant biomass in a subsurface flow constructed wetland in Brisbane, Australia. Water. Sci. Tech. 48(5): 183-189 p.
8. Chavarría Hernández J. C. (2001). Humedales artificiales de flujo vertical. Estado del arte y propuestas experimentales para la obtención de parámetros de diseño. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 142 p.
9. CONAGUA (2002). Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. Comisión Nacional del Agua. Documento Oficial. México, D. F. 294 p.
10. Crites J. y Tchobanoglous E. (2005). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. McGraw Hill. Colombia, 756 p.

11. Drizo A., Frost A., Grace J. y Smith K. (2000). Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate.
12. EPA. (2003). Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales.
13. EPA. (2000). Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. Environmental Protection Agency. United States.
14. Fenoglio Limón F. E. (2000). Bases de Diseño para la Construcción de un Reactor Biológico experimental Basado en los sistemas de Humedales Artificiales de Flujo Vertical. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma México. México.
15. González Rendón E. S. (2006). Evaluación in situ del efecto biológico de metales pesados en el ajolote *Ambystoma mexicanum*. Tesis de licenciatura. Facultad de ciencias. Universidad Nacional Autónoma México. México.
16. Granados Olvera T. (2005). Selección y propuesta de un sistema de tratamiento que permita obtener, a partir del agua de los canales de la zona chinampera, agua con calidad para riego de hortalizas. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma México. México.
17. Headley T. R., Huett DO y Davison L. (2001). The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetlands. *Water Sci. Tech.* 44(11-12): 159-167 p.
18. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>. Fecha de consulta 18-02-2009.
19. Jiménez Tovar B. J. (1999). Construcción y Arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo Humedal Artificial de Flujo Horizontal. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma México. México. 182 p.
20. Kadlec R. H. (2008). *The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing*. Segunda edición. Ed. CRC Press, Unites States, 1015 pp.
21. Langergraber G., Leroch K., Pressl A., Rohrhofer R. y Haberl R. (2008). A two-stage subsurface vertical flow constructed wetland for high-rate nitrogen removal. *Water Sci Technol* 57(12), 1881-1887 p.

22. Lara B. J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña.
23. Lara Borrero J.A. (1999). Depuración de aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña.
24. Legorreta J. (2006). El agua y la ciudad de México. De Tenochtitlán a la megalópolis del Siglo XXI. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México. 359 p.
25. Luna Pabello V. M., Durán de Bazúa C., Ramírez Carrillo H. F., Fenoglio Limón F. E. y Sánchez García H. (1997). Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química. San Luis, Argentina. Año IX, Núm. IX Vol. II: 325 p.
26. Luna Pabello V. M., Durán de Bazúa C., Ramírez-Carrillo H., Fenoglio-Limón F. y Sánchez-García H. (1997b). Sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de humedales artificiales. Una tecnología alterna para la protección del equilibrio ecológico en zonas urbanas. En Memorias de las III Jornadas Panamericanas. Medio Ambiente y Vivienda. Zacatecas, México. 78-83 p.
27. Luna Pabello V. M. y Ramírez Carrillo H. F. (2009). Humedales artificiales, una ecotecnología sustentable para la depuración de aguas residuales. Laboratorio de Microbiología Experimental, Departamento de Biología, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
28. Mackney B. (1990). The design of wetlands for wastewater treatment: An Australian perspective. En Memories of Constructed Wetland Water Pollution Control. Reino Unido. 471-479 p.
29. Maya Jasso E. A. (2008). Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 137 p.
30. Millán Hernández S. E. (1999). Operación de una Planta Piloto tipo Humedal Artificial de Flujo Horizontal para el Tratamiento de Aguas residuales y su reúso para riego. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 130 p.

31. Miranda Ríos M. y Luna Pabello V. M. (2001). Estado del arte y perspectivas de aplicación de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Serie Tratamiento Biológico de aguas residuales. 145 pp. Pub. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 968-36-8195-6.
32. NMX-AA-012-1980. Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
33. NMX-AA-029-1981. Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
34. NMX-AA-079-1986. Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
35. NMX-AA-099-1987. Análisis de aguas - determinación de nitritos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
36. Obarska-Pempkowiak H. (1996). Recent experience in operation of constructed wetlands in the Northern Poland. En Memories of 5th International Conference on Wetland systems for Water Pollution Control. Austria.
37. OMS. (2002). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. *Manual de capacitación para operadores*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Oficina Sanitaria Panamericana. Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Lima.
38. Pagano M. M. y Gauvreau K. (2001). *Fundamentos de Bioestadística*. Thomson Learning. México D.F. 525 p.
39. Ramírez Carrillo H. F. (2009). Inducción de la capacidad nitrificante de reactores experimentales empacados mediante cambios en los procesos de convección y difusión. Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa. Tesis en Proceso.
40. Ramírez Carrillo H. F. (1998). Desarrollo de la Ingeniería Básica para el Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales a base de un Humedal Artificial de flujo Combinado. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma México, D.F. 113 p.
41. Ramírez Carrillo H. F. (2003). Evaluación de la remoción biótica y abiótica de fosfatos en reactores empacados con diferentes materiales de uso potencial en

- Humedales Artificiales. Tesis de maestría. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma México. México, D.F. 93 p.
42. Romero Azuela A. A. (2006). Obtención de agua para riego agrícola restringido en chinampas de Xochimilco empleando un humedal artificial. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma México. México, D.F. 121 p.
43. Sanbucza Navarrete J. C. (1998). Manual de arranque, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería.
44. Sandoval Contreras J. (2008). Evaluación de la calidad de agua en los canales de Xochimilco para su recuperación ecológica. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma México. México D.F. 98 p.
45. Segura Miranda J. B. (2007). Efecto de la variación de oxígeno disuelto en la velocidad específica de nitrificación de agua y agua residual enriquecida con amonio. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma México. México, D.F. 89 p.
46. SEMARNAT. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Diario Oficial de la Federación.
47. SEMARNAT. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Diario Oficial de la Federación.
48. STPS. (2000). NOM-007-STPS-2000. Actividades agrícolas, instalaciones, maquinaria, equipo y herramientas-condiciones de seguridad. Secretaría del trabajo y previsión. México 2000.
49. Truu M., Juhanson J. y Truu J. (2009). Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of the Total Environment*.
50. Tyler G. H. (1960). Bombas, su selección y aplicación. Cecsca. México D.F. 530 p.
51. Valek G. (2008). La triste y asombrosa historia de un proyecto acuático. *Vertiente*. Volumen 151. 10-13, 145 p.

52. Vymazal J., Kröpfelová L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the Total Environment*.
53. Wilmer A., Guadalupe E. (2006). Diseño de Humedales Artificiales para el Tratamiento de aguas Residuales en la UNMSM. 17: 86-88 p.
54. Wood A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. *Water Sci. Technol.*
55. Wood A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. *Water Sci. Technol.*