



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza
Carrera de Biología

Evaluación de la calidad del agua del arroyo Panacuale y el establecimiento de plantas ornamentales en un sistema de humedales de flujo subsuperficial para tratar aguas residuales en el Campamento de Pesca Arcoíris, Puebla.

Tesis

Para obtener el título de

Bióloga

Presenta:

López Valentín María del Rosario

Directora de Tesis: Biól. Maricela Arteaga Mejía.

Laboratorio de Proyectos Ambientales



México D. F

Agosto, 2013



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.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme el espacio y un excelente desarrollo académico y profesional.

A mí querida Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, que más que una institución es mi segundo hogar, porque en ella encontré las bases que me llevarán a construir un futuro muy cercano, y así también por permitirme encontrar a grandes seres entrañables.

A mi directora de tesis Biól. Maricela Arteaga Mejía solo me resta decirle gracias, los buenos docentes siempre se recuerdan y usted seguirá siendo uno de ellos, no solo por mí, sino por las muchas generaciones que continúan. Gracias, porque al mismo tiempo su calidad humana siempre nos rodeó y nos empapó de un inmenso cariño.

A mis sinodales Biól. María de los Ángeles Galván Villanueva, Biól. Elvia García Santos, M. en C. Germán Calva Vásquez y Biól. José Luis Guzmán Santiago por su tiempo, paciencia y sobre todo por sus conocimientos que enriquecieron este trabajo, ¡mil gracias!

Al Campamento de Pesca Arcoíris en el Estado de Puebla, por el espacio y tiempo brindado para hacer posible este trabajo.

DEDICATORIAS

Su nombre es muy corto pero con un significado muy especial... y tú, sabes quién es...

Gracias a ti, hoy llego a una de mis más anheladas metas. Desde siempre me has acompañado y cuidado en todo momento, alentaste mis ganas de continuar en este camino que elegí cuando las cosas no eran fáciles. Tu fuerza, tus bendiciones y sobre todo tu amor dieron a mi interior lo que necesitaba. Hoy, la alegría y la emoción que invade mi ser solo pueden exclamar una sola palabra: ¡Gracias! por haberme acompañado en este maravilloso sueño hecho realidad...

Han sido y seguirán siendo mi más grande ejemplo a seguir....

La entrega que un padre y una madre hacen a un hijo es desmedido... y así de desmedido es el agradecimiento que hoy les doy a ustedes, por su incondicional apoyo y amor que me han dado a lo largo de mi vida. Este logro no solo es mío, sino también de ustedes. Que mi juventud los llene de amor, mi vida les doy quiero verlos felices; soy el fruto de sus vidas, sé que vida hay una y una vida ustedes me han dado, que Dios los conserve siempre aquí a mi lado...

Bulmaro López García y Soledad Valentín Ruíz
¡Los amo!

Mis hermanos...

Julio César, Jorge Eduardo, Angélica Berenice, Oscar Alan y Luis Uriel, gracias les doy por su paciencia en casa, gracias por haberme acompañado y llevar a cabo este proyecto, pero de manera muy especial a mi hermano Julio César, por el tiempo que me brindaste. Gracias nuevamente y los amo mucho.

Mis amigos...

Querida Mayra, Lulú, Pili, Nadia, Lety y María les doy las gracias por completar esta parte de mi vida, gracias con su compañía, gracias por tantos momentos de felicidad... ¡las quiero mucho!.. Así también quiero agradecer a mis amigos del laboratorio: Nadia, Lety, Caro y a mi muy estimado amigo Ángel; gracias chiquillos porque aprendí mucho de ustedes...

Una etapa he concluido, pero me faltan muchas más, si en el transcurso de todos esos caminos que me faltan por recorrer, encuentro a gente tan linda y buena como ustedes, entonces valdrá la pena vivirlos sin importar la dificultad que se presente...

¡Gracias!

María del Rosario López Valentín

ÍNDICE

1. RESUMEN	
2. INTRODUCCIÓN.....	1
3. MARCO TEÓRICO.....	2
3.1 Disponibilidad del agua en México.....	2
3.2 Disponibilidad del agua en Puebla.....	3
3.3 Usos de agua.....	3
3.4 Aguas residuales.....	3-4
3.5 Tratamiento de aguas residuales.....	4
3.6 Calidad del agua.....	5
3.7 Índices de la calidad del agua.....	5-6
3.8 Humedales.....	6
3.9 Funciones de los humedales.....	6
3.10 Tipos de humedales.....	7-10
3.11 Componentes de los humedales construidos.....	10-12
3.12 Mecanismos de remoción de los humedales.....	12-15
3.13 Especies vegetales en los humedales construidos.....	16-17
3.14 Biomasa vegetal en los humedales construidos.....	18
4. ANTECEDENTES.....	19
5. PROBLEMÁTICA.....	20
6. JUSTIFICACIÓN.....	21
7. HIPÓTESIS.....	22
8. OBJETIVOS.....	23
9. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	24-25
10. MÉTODO.....	26-29
11. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	28-49
12. CONCLUSIONES.....	52
13. RECOMENDACIONES.....	53
14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54-59
15. ANEXOS.....	60-61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones Hidrológico-Administrativas en México.....	2
Figura 2. Humedal construido con flujo superficial.....	8
Figura 3. Humedal construido con flujo subsuperficial horizontal.....	9
Figura 4. Humedal construido con flujo subsuperficial vertical.....	10
Figura 5. Modelo de un humedal de flujo subsuperficial y sus componentes.....	12
Figura 6. Procesos de remoción en un humedal de flujo subsuperficial.....	15
Figura 7. Platanillo (<i>Canna indica</i>).....	16
Figura 8. Hoja elegante (<i>Xanthosoma sagittifolium</i>).....	17
Figura 9. Palma areca (<i>Dypsis lutescens</i>).....	17
Figura 10. Santa Rita Tlahuapan, Puebla –Campamento de pesca Arcoíris. Imagen Satelital Google Earth (2011).....	24
Figura 11. Diagrama completo y puntos de muestreo en el en el campamento de pesca Arcoíris. Vista aérea.....	27
Figura 12. Diagrama del HCFSSH. Vista lateral.....	28
Figura 13. Diagrama del HCFSSH. Vista aérea.....	28
Figura 14. Imágenes del daño en las plantas a causa de las bajas temperaturas ambientales. Hoja elegante (<i>Xanthosoma sagittifolium</i>) y Palma areca (<i>Dypsis lutescens</i>)....	49

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Rango de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general.....	6
Cuadro 2. Parámetros de la calidad del agua y técnicas con base a las Normas Oficiales Mexicana.....	29
Cuadro 3. Características de población, Morláns (2004).....	29
Cuadro 4. . Biomasa en peso húmedo generada en dos diferentes tipos climas.....	51

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Temperatura.....	30
Gráfica 2. Potencial de Hidrógeno (pH).....	32
Gráfica 3. Alcalinidad.....	33
Gráfica 4. Oxígeno Disuelto.....	34
Gráfica 5. DBO ₅ -DQO.....	35
Gráfica 6. Nitrógeno Amoniacal y Orgánico.....	37
Gráfica 7. Nitritos (NO ₂ ⁻).....	39
Gráfica 8. Nitratos (NO ₃ ⁻).....	41
Gráfica 9. Fosforo Total.....	42
Gráfica 10. Fosforo Ortosoluble.....	43
Gráfica 11. Sustancias Activas al Azul de Metileno.....	44
Gráfica 13. Sólidos Suspendidos.....	45
Gráfica 12. Sólidos Totales.....	46
Gráfica 14. Índice de la Calidad del Agua (ICA).....	47
Gráfica 15. Supervivencia total de plantas.....	48
Gráfica 16. Promedio de crecimiento de hoja elegante M1.....	49
Gráfica 17. Promedio de crecimiento de platanillo M1 y M2.....	50



1. RESUMEN

El arroyo Panacuale se ubica en la localidad de Santa Rita Otlatla en el estado de Puebla donde prevalece un clima de tipo semifrío húmedo. Este arroyo abastece al campamento de pesca Arcoíris; sin embargo, su calidad hídrica no es apta para realizar actividades recreativas.

Debido a esto, se llevó a cabo el tratamiento del afluente en un sistema de humedales de flujo subsuperficial dividido en dos módulos, en donde la vegetación junto con el tipo de sustrato y los microorganismos lograron mejorar la calidad del efluente.

Los resultados de los parámetros físicos y químicos de los módulos 1 y 2 cumplen satisfactoriamente con los Límites Máximos Permisibles (LMP) que la normatividad mexicana establece, con excepción de la DBO_5 , ya que se registró concentraciones de 68 mg L^{-1} y 34.01 mg L^{-1} respectivamente. Sin embargo, de acuerdo al Índice de la Calidad del Agua (ICA) el efluente tratado alcanzó a ingresar en el rango "aceptable" mejorando su calidad hídrica respecto al afluente con un rango "poco contaminado".

Por otra parte, la vegetación que se plantó en ambos módulos indicó que las especies *Canna indica* (platanillo) y *Xanthosoma sagittifolium* (hoja elegante) lograron sobrevivir a las condiciones climáticas de la zona, donde se registraron temperaturas ambientales por debajo de los 0°C , siendo *Canna indica* la especie con mayor tolerancia a este entorno con el 91% de sobrevivencia y un crecimiento de 1.50 m en promedio. *Xanthosoma sagittifolium* solo registro el 9% de sobrevivencia con una altura final de 1.20 cm. La biomasa en peso húmedo que se registró para el módulo 1 fue de 4.550 Kg y para el módulo 2 4.550 Kg con biomasa en peso seco de 1.665 Kg y 2.505 Kg respectivamente.

Los humedales de flujo subsuperficial junto con la vegetación en climas semifríos, alcanzaron porcentajes de remoción significativos hasta los 12 meses de funcionamiento del sistema, ya que la temperatura ambiental de -8°C fue un factor limitante para la dinámica de los procesos de depuración, aclimatación y crecimiento de la vegetación, por lo que un adecuado mantenimiento del sistema logrará los rendimientos óptimos de remoción que estos sistemas proporcionan.



2. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial e indispensable para el desarrollo de la vida. Sin embargo, en la actualidad su disponibilidad ha disminuido paulatinamente debido a la contaminación de las reservas hídricas, ocasionando un desequilibrio ambiental, social y económico (Esponda, 2001).

En este sentido, las aguas superficiales naturales como ríos y lagos son los más afectados, producto de las actividades humanas. El crecimiento urbano, y la indolencia cultural de diversos sectores de desarrollo como el industrial, agropecuario y urbano afectan a la flora, fauna y la funcionalidad de los ecosistemas, además de las implicaciones que esto puede tener en la salud de las poblaciones aledañas. (Ramírez *et al.*, 2009).

En México se calcula que existen cerca de setenta lagos, los más importantes se ubican en la zona occidental del eje Neovolcánico transversal (De la Vega, 2003). Estos ecosistemas acuáticos, representan la base natural de la economía nacional, al mismo tiempo constituyen recursos que el país debe conservar, rehabilitar y/o restaurar (Maldonado, 2008).

Las aguas residuales son una materia prima que contiene productos útiles (agua y materia orgánica) y otros que son perjudiciales; por lo cual resulta conveniente separar éstos últimos y aprovechar los demás en beneficio de diferentes aplicaciones (Calvo, 1999).

Una alternativa para esta situación es el tratamiento del afluente residual; a nivel nacional su manejo resulta insuficiente e inadecuado, debido a carencias de infraestructura, altos costos de tratamiento, falta de mantenimiento y carencia de personal capacitado; lo que ocasiona que sólo el 37.5 % de las aguas residuales reciban un tratamiento adecuado (CONAGUA, 2011)¹.

Esta situación ha conllevado a la necesidad de desarrollar tecnologías eficientes y de bajo costo para la depuración de efluentes contaminados; por lo que hoy en día se han desarrollado los sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial, que en conjunto con plantas ornamentales, logran la degradación de contaminantes y se perfilan como una alternativa de tratamiento sostenible y de alta eficiencia (De la Orta y Muñoz, 2011).

¹<http://www.conagua.gob.mx/atlas/>

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Disponibilidad del agua en México

México es un país con 13 Regiones Hidrológico-Administrativas formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos (CONAGUA, 2011) (Figura 1).



Figura 1. Fuente: CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, 2008. México, D.F., 2009

El crecimiento de la población y la industrialización en los últimos años han provocado el aumento drástico de la demanda sobre este recurso (Ramsar, 2008)¹. Debido a esto, se ha requerido implementar indicadores que permitan detectar los posibles problemas de carencia de agua, siendo la disponibilidad natural media *per cápita* ($m^3/hab. año$) una de los más utilizados a nivel mundial (CONAGUA, 2011).

México cuenta con una disponibilidad *per cápita*² inferior al 40% respecto a la de Estados Unidos y tan sólo en 14% con Canadá. Al respecto, la disponibilidad media anual de agua para cada mexicano ha disminuido de $11.5 m^3/hab$ en la década de 1950, a $4.5 m^3/hab$ en la actualidad; previendo que disminuya a tan sólo $3.5 m^3/hab$ para el 2025; provocando un problema severo en el abastecimiento hídrico de la población (Mazari- Hiriart, 2005).

¹<http://www.ramsar.org/pdf/www/8/cd/wwwd2008a09sp%20water.df>

² De acuerdo a este indicador la disponibilidad de las regiones y países se clasifican de la siguiente manera: menos a 1000, extremadamente baja; de 1001 a 2000, muy baja; de 2001 a 5000, baja; de 5001 a 10000, media; de 10001 a 20000, alta; y más de 20001, muy alta.



3.2 Disponibilidad del agua en Puebla

De manera particular, el estado de Puebla forma parte de la Región hidrológico-administrativa del Balsas IV, y pertenece a una de las cinco zonas metropolitanas del país con mayor población, ocupa el cuarto lugar con aproximadamente 2.74 millones de habitantes lo que provoca el aumento en la demanda del recurso agua (CONAGUA, 2011). En 2007, el país tenía una disponibilidad natural media de 458 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, 49 mil 744 millones de metros cúbicos de agua que se importan de otros países y se exportaron 432 millones de metros cúbicos.

3.3 Usos del agua

El agua es empleada de diversas formas, y prácticamente interviene en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

En el país, el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), clasifica los usos de este recurso en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos³, dentro de los cuales está el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas y el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte ya que corresponde a un uso no consuntivo⁴. Los volúmenes designados para el uso consuntivo registran que el 63% del agua utilizada proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos). En este sentido, los porcentajes del agua superficial y subterráneas concesionadas durante el periodo 2001-2009 incrementaron en un 14 y un 19% respectivamente, lo cual indica que la demanda del recurso es mayor cada 9 años (CONAGUA, 2011).

3.4 Aguas residuales

La NOM-001-SEMARNAT, 1996 define que las aguas residuales son aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Las aguas residuales están compuestas de material suspendido y componentes disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos. Sus constituyentes *convencionales* son: sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica e inorgánica medida como demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO, respectivamente), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniaco, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus (Metcalf y Eddy, 2003).

³Cuando existe consumo, entendido como la diferencia entre el volumen suministrado y el volumen descargado.

⁴ Usos que no consumen agua como la generación de energía eléctrica, que utiliza el volumen almacenado en presas.



Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las segundas son las que se descargan directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida. (CONAGUA, 2011).

3.5 Tratamiento de aguas residuales

Ante la problemática de contaminación en el agua, se ha requerido implementar diferentes tratamientos físicos, químicos y biológicos que remuevan contaminantes con la finalidad de dar un reúso a las aguas residuales.

Tratamiento primario: consiste en el cribado o desbrozo, sedimentación, flotación, separación de aceites, homogeneización y neutralización. Se emplea para la eliminación de sólidos en suspensión y materiales flotantes, además de poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario.

Tratamiento secundario: lodos activados, aireación prolongada, estabilización por contacto, lagunas aeróbicas, anaeróbicas, y filtros biológicos. Con ellos se logra la remoción de nitrógeno inorgánico (nitrato y amonio), además de otros compuestos (Eugenio y Gallardo, 2009)

Tratamiento terciario: microtamizado, filtración, precipitación, coagulación, adsorción, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, cloración y procesos de reducción de nutrientes. Su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se retiraron en el tratamiento secundario (Ramalho, R. S. 1996).

En México existen 2,029 plantas de tratamiento en operación de las cuales el 46.43% utilizan el proceso de lodos activados, y hasta el año 2009 solo se trataban 88.1 m³/s, es decir el 42% de los 209.1 m³/s recolectados en los sistemas de alcantarillado de las descargas municipales (CONAGUA, 2011). Este porcentaje promueve la necesidad de incrementar el tratamiento de las aguas residuales.



3.6 Calidad del agua

La calidad del agua no es una característica absoluta, sino que es más un atributo definido socialmente en función del uso que se le piense dar al líquido (WRI, 2000), por lo que cada uso requiere un determinado estándar de calidad. Por esta razón, para evaluar la calidad del agua se debe ubicar en el contexto del uso probable que adquirirá el efluente.

Para la evaluación de la calidad del agua se utilizan tres indicadores fundamentales Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) que permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa (CONAGUA, 2011).

3.7 Índice de la Calidad del Agua

Para evaluar la calidad o grado de contaminación del agua se han desarrollado diversos índices de calidad tanto generales como de uso específico. En México se emplea el llamado Índice de Calidad del Agua (ICA), que agrupa de manera ponderada algunos parámetros del deterioro de la calidad del líquido, aplicado Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Este índice se expresa como porcentaje de agua pura, por lo tanto un valor igual o cercano a 0% será para agua altamente contaminada y un valor cercano al 100% indica agua en excelentes condiciones (SEMARNAT, 2002). Los parámetros considerados para el cálculo se seleccionan por su importancia relativa para reconocer el grado de contaminación y estos pueden ser: pH, Sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, DBO, DQO, alcalinidad, nitritos, fosfatos totales y la temperatura de la muestra.

El cálculo del ICA se realiza aplicando la ecuación siguiente (SEMARNAT, 2002)

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Dónde: ICA = Índice de la calidad del agua global
 I_i = Índice de calidad para el parámetro i
 W_i = Coeficiente de ponderación del parámetro i
N = Número total de parámetros



La calidad del agua se estima a partir del valor obtenido del ICA (Tabla 1), este índice es una herramienta útil en el programa de gestión del recurso hídrico.

Cuadro1. Rango de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general

Criterio General	ICA
Excelente	85-100
Aceptable	70-84
Poco contaminado	50-69
Contaminado	30-49
Altamente contaminado	0-29

Fuente: Subdirección General Técnica. Gerencia de Saneamiento y Calidad del agua. CONAGUA. 2006

3.8 Humedales

Definición

Se denominan humedales a todas aquellas áreas que se encuentran inundadas por aguas dulces o saladas, temporales o permanentes y que presentan una vegetación típica adaptada para vivir en condiciones de suelo saturado (Torres, 2005), estos pueden ser de dos tipos: naturales o construidos (artificiales) (Hammer y Bastian, 1989); (Vymazal, 1998).

3.9 Funciones de los humedales

Walbridge (1993), clasifica a las funciones de los humedales en tres categorías:

Hidrológicas: incluyen la descarga de aguas subterráneas, control de inundaciones y protección de la ribera contra la erosión (Torres, 2005).

Bioquímicas: un número de importantes procesos bioquímicos son favorecidos en los humedales debido a las aguas poco profundas, producción primaria alta, sedimentos anaerobios y aerobios, además de que ayuda a remover basura por lo que se consideran limpiadores naturales de dichas aguas (Mitsch y Gosselink, 2000).

De hábitat: está referida a la fauna y vegetación. Faunísticamente, numerosos humedales son grandes ecosistemas productivos, que soportan a un gran número de especies, como peces, reptiles y anfibios; dependiendo exclusivamente del hábitat del humedal. Las especies utilizan los humedales sólo en pequeños periodos de su ciclo de vida y algunos casos los usan como fuente de agua y de alimento (Campos, 2011).

En lo que respecta a la comunidad vegetal, se encuentra entre los grandes ecosistemas productivos en el mundo. La producción de biomasa y la aportación de carbono orgánico forman parte de la cadena alimenticia (Mitsch y Gosselink, 2000).



3.10 Tipos de Humedales

Humedales Naturales (HN)

Son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático, además sirven como enlace dinámico entre los dos medios. Poseen un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confiere un elevado potencial autodepurador. Entre los humedales naturales se encuentran los pantanos, marismas, ciénagas, esteros, manglares, etc. (Llagas y Gómez, 2006)

En los últimos años se han reconocido las múltiples funciones y valores de los humedales naturales. Estos sistemas debido a la gran cantidad de luz, agua y nutrientes, conjuntamente con la presencia de plantas que han desarrollado adaptaciones morfológicas y bioquímicas se encuentran entre los más sistemas productivos del mundo. La alta productividad de estos sistemas da como resultado una alta productividad microbiana y en consecuencia una alta capacidad para descomponer la materia orgánica (Arias, 2004).

Humedales Construidos (HC)

La capacidad asimilativa obtenida en experiencias realizadas con vertidos controlados de aguas residuales en los humedales naturales, ha conducido a la construcción de humedales artificiales con la única finalidad de reutilizar un recurso que mundialmente es escaso.

Los HC generalmente se asemejan a los humedales naturales (Arias y Brix, 2003). Estos sistemas reproducen los procesos que ocurren en la naturaleza, como es la capacidad de autopurificación de los sistemas acuáticos (ríos, lagos, mares y humedales), es decir, su capacidad de limpiarse cuando se alteran sus condiciones naturales al recibir agua residual de diversos tipos (Torres, 2005):

- Aguas domésticas y urbanas
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana (Delgadillo *et al.*, 2010).

Son una tecnología de tratamiento simple de operar, con muy baja producción de lodos residuales y sin consumo energético. No requieren de la adición de reactivos químicos de energía para airear el agua o recircularla. La infraestructura necesaria para su construcción es muy simple, su mantenimiento es relativamente fácil y económico (Mejia *et al.*, 2002).

Con base a la forma en la que se presentan las macrófitas enraizadas emergentes, los Humedales Construidos se dividen en diferentes tipos (Delgadillo *et al.*, 2010).

Humedales Construidos de Flujo Superficial (HCFS)

Son los más similares a los de ambientes naturales, debido a que el agua está estancada permanentemente y las condiciones favorables para el establecimiento de las especies de plantas (Scholz y Lee, 2005).

Estos sistemas por lo general, tienen un fondo de suelo, vegetación emergente, y agua de superficie por encima del sustrato. Este tipo de humedal es una modificación al sistema de lagunas convencionales.

Además, en términos de paisaje este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etc. y pueden constituirse en lugares turísticos (Delgadillo *et al.*, 2010) (Figura 2).

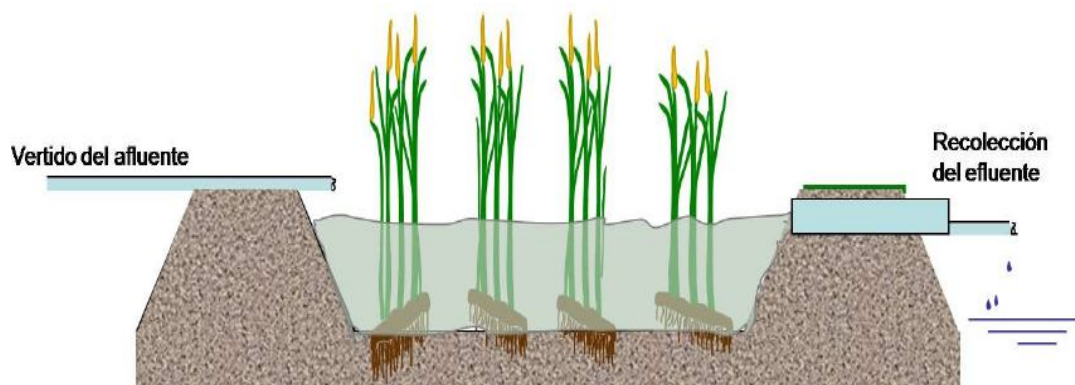


Figura 2. Humedal construido con flujo superficial.

Fuente: (García y Corzo, 2008)

Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial (HCFSS)

Son sistemas utilizados como tratamiento secundario o terciario. Están precedidos por algún tratamiento físico simple que tiene como finalidad eliminar las partículas de mayor grosor y evitar así la colmatación de la zona de entrada a los humedales (Arias, 2004).

Así mismo, se caracterizan porque la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercada a los 0.6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto permanente con los rizomas y raíces de las plantas.

Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal (HCFSSH)

El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama de grava, plantada con macrófitas acuáticas. El agua residual se trata a medida que fluye horizontalmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho es aproximadamente de 0.6 m y tiene una pendiente de entre 0,5 a 1%. El agua ingresa de manera horizontal, es aplicada en la parte superior de un extremo y recolectada por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. (Delgadillo *et al.*, 2010) (Figura 3).

Otras de las ventajas de este sistema consiste en que hay mejor control de olores y un aislamiento térmico y una mayor formación de biopelícula, debido a una mayor superficie específica, proporcionada por el material de relleno (Arias, 2004). El efluente final puede alcanzar la calidad del agua obtenida en un sistema de tratamiento secundario avanzado (Torres, 2005).

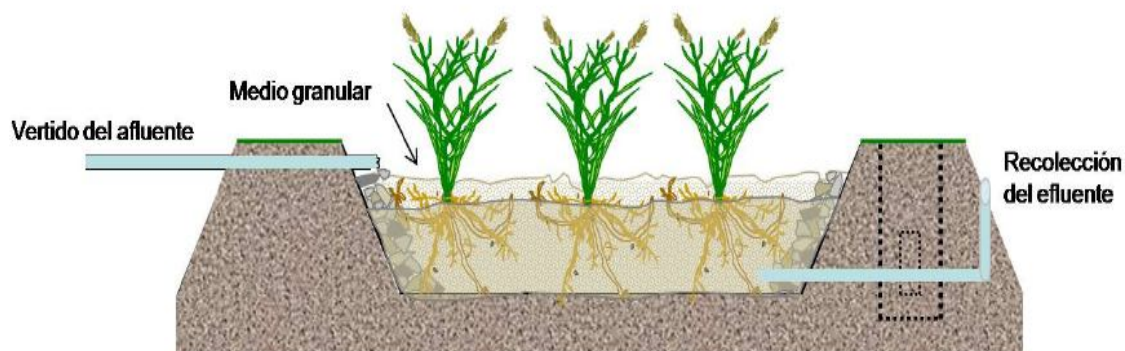


Figura 3. Humedal construido de flujo subsuperficial Horizontal (HCFSSH)

Fuente: (García y Corzo, 2008)

Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical (HCFSSV)

En este caso el lecho no se encuentra saturado, porque normalmente el agua es suministrada al humedal de manera intermitente, esto es en periodos secos y periodos de alimentación, permitiendo la percolación a través del medio. Durante el periodo de alimentación el aire es forzado a salir del lecho por el agua entrante; durante el periodo seco, a través de los poros del lecho fluye el aire atmosférico, incrementándose la oxigenación del medio filtrante. En general la eficiencia del proceso de depuración depende en gran medida de la aireación del sustrato (Torres, 2005) (Figura 4).

La profundidad del medio granular es de entre 0.5 y 0.8 m y estos sistemas tienen mayor capacidad de tratamiento que los horizontales, sin embargo son más susceptibles a la colmatación (García y Corzo, 2008).

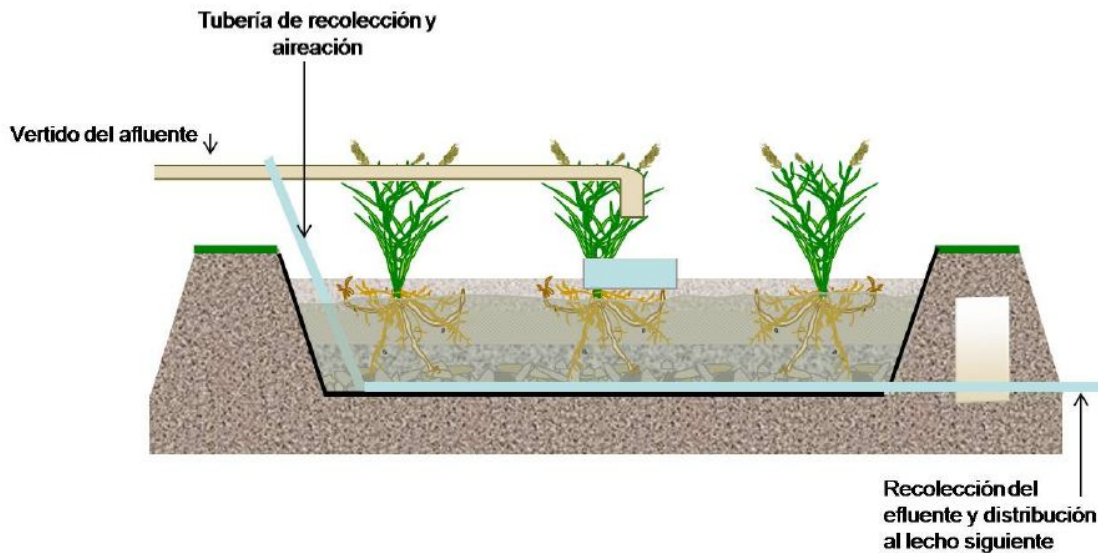


Figura 4. Humedal construido con flujo subsuperficial vertical (HCFSSV)

Fuente: (García y Corzo, 2008)

3.11 Componentes de los humedales construidos

Sustrato

La principal característica del sustrato es que debe de tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente gravas finas y bien graduadas con un tamaño máximo de arido de 5 mm aproximadamente y con poros finos. Esta característica es fundamental ya que actúa directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende al caudal de agua a tratar.

Algunas de las características importantes que posee el sustrato dentro de los humedales construidos son:

- Soporta a una gran diversidad de microorganismos. .
- La permeabilidad afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Las principales transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para diferentes contaminantes
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, que da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).



De forma indirecta el sustrato también contribuye a la eliminación de contaminantes, ya que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas y para el desarrollo de colonias de microorganismos que llevarán a cabo la actividad biodegradadora (tratamiento biológico) de la materia orgánica que es fundamental en este tipo de sistemas (Arias, 2004).

Vegetación

La vegetación que se introduce en los humedales construidos es un factor fundamental para obtener rendimientos óptimos en la depuración de aguas residuales. El papel de la vegetación en estos sistemas está determinado por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas tienen como función principal absorber energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Además tiene la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y para el proceso de nitrificación (Delgadillo, *et al.*, 2010).

Microorganismos

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo (Lara, 1999). Actúan como vínculo de unión entre los procesos de producción primaria y secundaria, propician la reintroducción de compuestos inorgánicos en el sistema y producen biomasa microbiana susceptible de servir como alimento a organismos detritívoros (Álvarez, 2005).

La comunidad microbiana en humedales construidos se compone de microorganismos autóctonos y alóctonos. Los organismos autóctonos (bacterias, levaduras, hongos y protozoarios) presentan características adaptativas, que son capaces de poseer actividad metabólica, sobrevivir y crecer en los sistemas de humedales participar en procesos de remoción en el agua, mientras que los microorganismos alóctonos (incluyendo patógenos que entran a las aguas residuales) por lo general no lo hacen sobrevivir o tener alguna importancia funcional en el humedal ambiente (Perchet, 2007).

En conjunto llevan a cabo diferentes procesos como la degradación de la materia orgánica, la transformación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004) y a su vez se adquiere un control en el sistema que permite la redistribución (Figura 5).

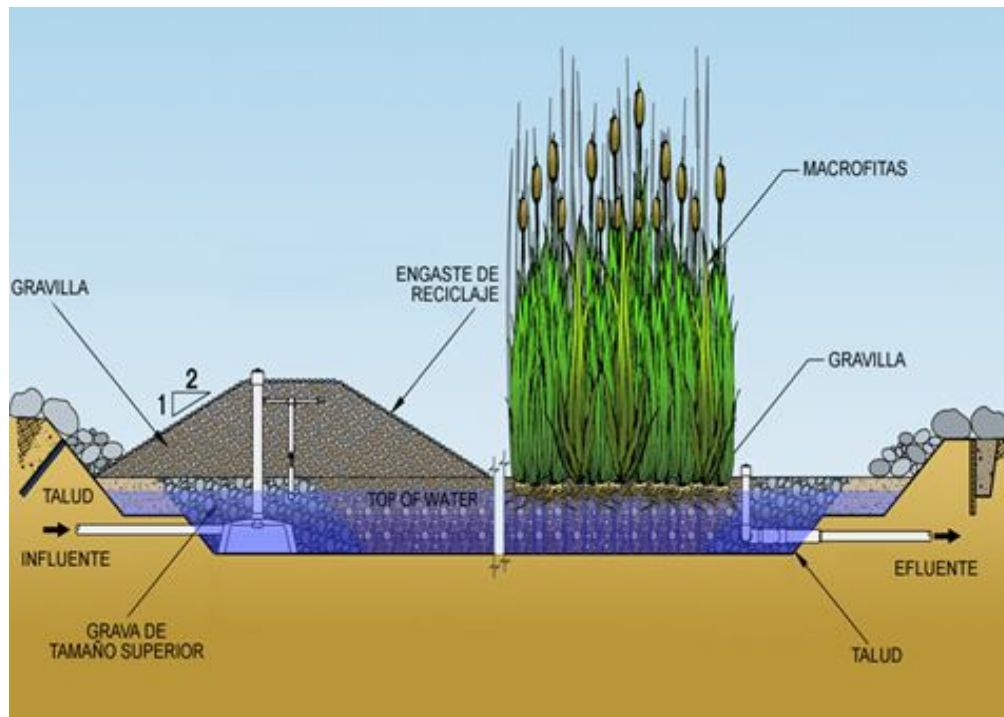


Figura 5. Modelo de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal y sus componentes.
Fuente: (Modificado de Natural Systems International, 2010)

3.12 Mecanismos de remoción de contaminantes

Los contaminantes en aguas residuales consisten en su mayor parte de macronutrientes para las plantas (P y N), sólidos y patógenos. Aunque los nutrientes son necesarios para el crecimiento de las plantas, un exceso en los cuerpos de aguas conduce a condiciones adversas para la vida acuática. La remoción de estos, es esencial para la salud de los ecosistemas acuáticos. En los humedales construidos, la remoción de sólidos y nutrientes es facilitada por el agua poco profunda, una producción primaria alta y la presencia de condiciones aerobias y anaerobias (Mitsch y Gosselink 2000).

Remoción de sólidos

Los humedales filtran y sedimentan los remanentes del tratamiento previo, complementando la remoción (Delgadillo *et al.*, 2010). El proceso se genera cuando las partículas que entran al humedal quedan retenidas principalmente por tres motivos: a) las construcciones del flujo producidas por el medio granular, b) la baja velocidad existente y c) las fuerzas de adhesión entre partículas. A estos procesos físicos se les denomina filtración del medio granular. Las raíces también colaboran en esta retención física de las partículas sólidas (Arias, 2004).



Remoción de materia orgánica

La eliminación de la materia orgánica es el principal objetivo de los humedales construidos como tratamiento secundario en aguas residuales. Entre otras sustancias orgánicas, en el agua residual se encuentran carbohidratos, grasas animales, aceites, fenoles, proteínas, agentes tensoactivos, y productos agrícolas. La materia orgánica que entra en los humedales se puede dividir en particulada y disuelta. La materia orgánica particulada forma parte de la materia en suspensión por lo que tiene sus mismos mecanismos de eliminación mientras que la disuelta se elimina por medio de la respiración microbiana. Es realizada por los microorganismos, que están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza (Delgadillo, *et al.*, 2010). La principal vía para la eliminación de materia orgánica acumulada en un humedal es la descomposición, es decir, la conversión de moléculas orgánicas complejas a constituyentes orgánicos e inorgánicos simples. Es conveniente que la degradación de la materia orgánica tanto en los humedales naturales como en los construidos se realice mediante la actuación de microorganismos aerobios ya que la descomposición aerobia acostumbra a ser más rápida y completa que la anaerobia y por tanto se evitan problemas de olores asociados a los procesos de descomposición anaerobia.

La degradación aerobia de la materia orgánica disuelta se produce gracias a la presencia de bacterias heterótrofas aerobias y ocurre en varias etapas en las zonas del humedal donde hay ausencia de oxígeno disuelto. El proceso es realizado por bacterias heterótrofas de tipo anaerobio estricto o facultativo. En la primera etapa los productos obtenidos en la fermentación son ácidos grasos como el acético y el láctico, alcoholes como el etanol y gases como el CO₂ y el H₂.

El primero de los compuestos en formarse y el más abundante en los humedales de flujo subsuperficial el ácido acético, a partir de éste comienzan a actuar las bacterias que utilizan los productos finales de la fermentación para continuar su proceso de degradación.

En la mayoría de humedales construidos predominan las condiciones reductoras, que es sinónimo de concentraciones de oxígeno disuelto muy bajos. La degradación anaerobia es mucho más lenta que la aerobia y predomina en profundidad donde el oxígeno disuelto es limitado y cuando existen cargas orgánicas altas (Arias, 2004).



Remoción de nitrógeno

El nitrógeno entra al humedal en forma orgánica e inorgánica. El nitrógeno orgánico es mineralizado, y este entra al ciclo del nitrógeno orgánico. Las formas inorgánicas son amoníaco (N-NH_3), amonio (N-NH_4), nitritos (N-NO_2^-) y nitratos (N-NO_3^-). La mayoría del nitrógeno inorgánico entra al humedal en forma de amoníaco y amonio. El amoníaco puede ser volatilizado o tomado por plantas o microorganismos. Bajo condiciones aerobias, este puede ser transformado en nitratos en el proceso de nitrificación. Similarmente, el amonio puede ser tomado por la biota o ser transformado en nitratos (Torres, 2005).

En humedales construidos, la nitrificación (la oxidación de amoníaco y amonio a nitritos y a nitratos) ocurre en áreas del sustrato o en columna de agua. El oxígeno está presente en la superficie y en la zona de la raíz, donde entra al suelo vía difusión por las raíces de las plantas. Los nitratos dentro de áreas anaerobias del sustrato son reducidos por bacterias a óxido nitroso (N_2O) o nitrógeno atmosférico (N_2), en un proceso llamado desnitrificación. Ambos N_2O y N_2 son desprendidos a la atmósfera (Gambrell y Patrick, 1978).

El resultado de la nitrificación es el camino más importante para la remoción de nitrógeno (Faulkner y Richardson, 1989), debido a que su transformación incluye procesos de microorganismos, su remoción se incrementa durante la temporada de crecimiento de estos, es decir cuando existen temperaturas favorables para su reproducción y desarrollo. En condiciones de temperaturas bajas o suelos ácidos la desnitrificación es menos dinámica (Torres, 2005).

Remoción de fósforo

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos (APHA 1992).

Este nutrimento se presenta en tres diferentes formas: ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Se considera que cerca del 25% del fósforo total fijado está presente como ortofosfatos tales como: PO_4^{3-} (Fosfato), HPO_4^{2-} (Fosfato monoácido) H_2PO_4 (Fosfato diácido), y H_3PO_4 (ácido fosfórico) los cuales deben estar disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total.

El fósforo puede ser absorbido por las plantas en diferentes formas iónicas como: HPO_4^{2-} y principalmente H_2PO_4 , los cuales se integrarán al metabolismo en el proceso de fotosíntesis, razón por la cual disminuye su concentración en el agua a su paso por los humedales (Romero, 2009). Además, puede ser aprovechado por los microorganismos o

fijado en el sustrato, lugar donde ocurre la remoción de ortofosfatos como consecuencia de la adsorción, formación de complejos y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato (Delgadillo *et al.*, 2010). Sin embargo, la cantidad de fósforo en el efluente es prácticamente el mismo que en el influente. En consecuencia, la cantidad de fósforo asimilado o fijado en el sustrato es pequeña en relación a la aportada por el agua residual, lo que provoca que este proceso sea eficiente en períodos cortos hasta que el medio se sature (Romero, 2009).

De manera conjunta los procesos de remoción en los humedales construidos de flujo subsuperficial contribuyen a que el efluente final adquiera una calidad hídrica que pueda ser utilizada para diferentes actividades de consumo (Figura 6).

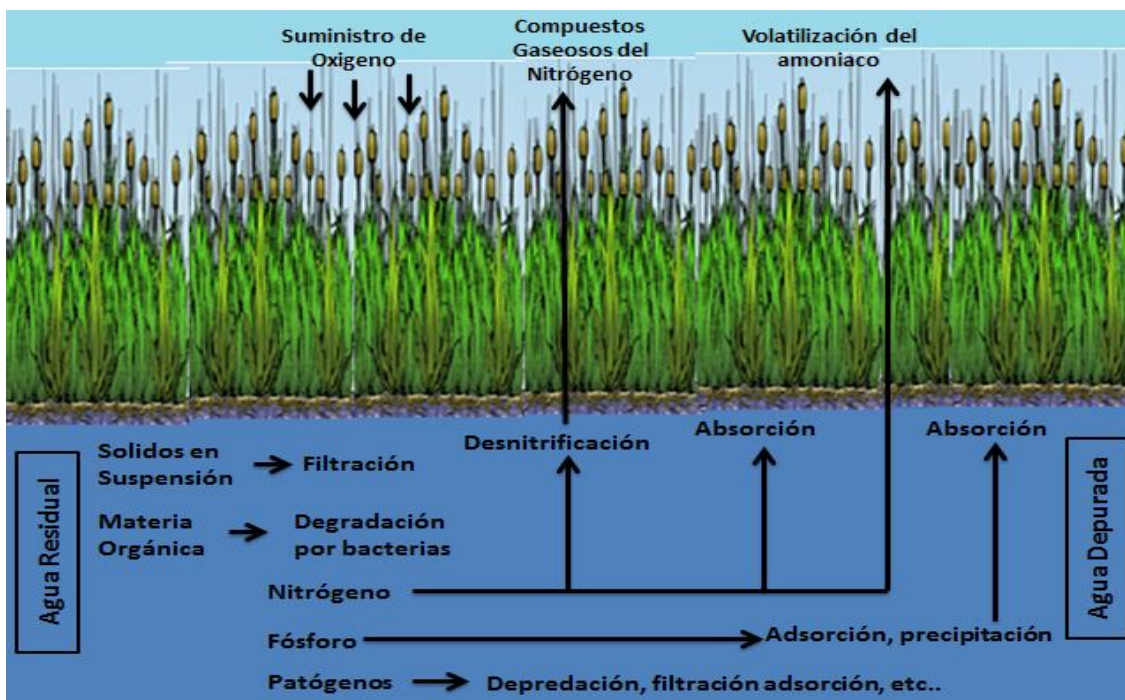


Figura 6. Procesos de remoción en un humedal de flujo subsuperficial horizontal.

Fuente: Mejorado de (De la Orta y Muñoz, 2010).

3.13 Especies vegetales en los humedales construidos

Las plantas que últimamente han sido utilizadas en los HCFSSH, poseen características de tipo ornamental, las cuales suelen ser atractivas y contribuyen al paisaje escénico, además de que forman parte fundamental para la remoción de los diferentes contaminantes en el agua de tratado. Algunos ejemplos de las especies utilizadas son las siguientes:

Platanillo (*Canna indica*)

El género *Canna* es el único de la familia *Cannaceae*, y comprende 10-12 especies distribuidas por los trópicos y subtrópicos del nuevo mundo (Sánchez, 2004). Es una planta herbácea robusta que florece y fructifica prácticamente durante todo el año, alcanza alturas de 0.5 a 3.5 m de altura.

Esta planta se adapta mejor en terrenos cenagosos perturbados, cercanos a corrientes de agua, con altitudes de 250 a 1950 msnm (Calderón, 1998). En cuanto a los requerimientos nutrimentales del suelo es poco exigente, sin embargo; prefiere suelos ricos en orgánicos y resiste al sol directo o semisombra (Espinosa *et al.*, 2009).

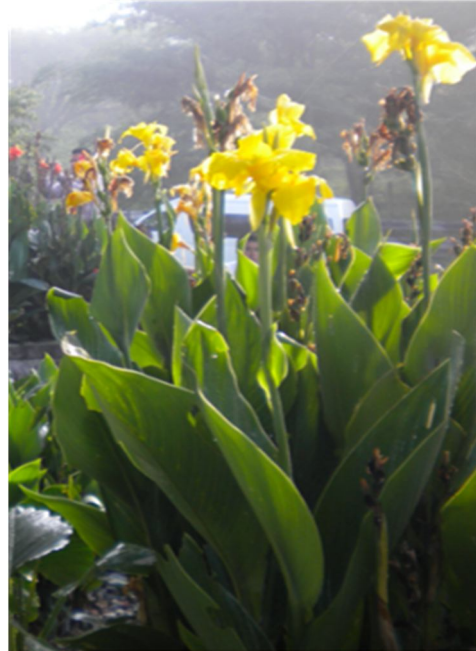


Figura 7. Platanillo (*Canna indica*) en un HCFSSH Apaxtla de Castrejón, Guerrero

Hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*)

Morfológicamente se considera una planta herbácea de aproximadamente 2 m de altura, suculenta, sin tallos aéreos. Las hojas provienen directamente de un cormo subterráneo el cual es más o menos vertical. Las hojas son grandes, sagitadas, de base cordiforme.

Se produce en climas tropicales calientes, con temperaturas medias aproximadas de 25°C y mínima de 18°C, con alta humedad relativa. Requiere un régimen de lluvias de 800-1000 mm durante su ciclo de producción. Soporta periodos cortos de sequía (Montaldo, 1991).



Figura 8. Hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) en un HCFSSH Apaxtla de Castrejón, Guerrero

Palma areca (*Dypsis lutescens*)

Es muy conocida debido a su uso como palmera de interior. Altura 1.5 a 3 m cuando forma mata de muchos troncos o hasta 9 m cuando es tronco único. Tronco anillado de diferente edad y altura. Posee peciolo y raquis amarillento, hojas dispuestas en 3 filas verticales, pinnadas, de 1.5 a 2 m de largo. Presenta 20-50 pares de foliolos. Inflorescencias de 40 a 50 cm, muy ramificadas, flores blanquecinas muy aromáticas y frutos amarillos, que se van tornando violáceo-negruzcos.

Esta planta puede vivir en pleno sol, pero lo hace mejor en semisombra. Las hojas tienen mejor color a la sombra. Es apropiada para los climas comprendidos entre el subtropical y tropical. Puede tolerar heladas ligeras (-2 °C) si se aclimata al exterior, atmósfera húmeda (www.infojardin.com).



Figura 9. Palma areca (*Dypsis lutescens*) en un HCFSSH Apaxtla de Castrejón, Guerrero.



3.14 Biomasa vegetal en los humedales construidos

La biomasa es considerada como la cantidad de material orgánico acumulado por las plantas o por alguno de sus órganos y es una variable ampliamente usada en estudios de fisiología, de crecimiento y de productividad de las plantas, toda vez que es un indicador del material estructural y energético que la planta produce o destina a sus órganos en un periodo o en toda su vida (Espinoza, 2007)

Existen dos métodos comúnmente usados para estimar la biomasa: el método directo y el indirecto. Dentro del primero está el destructivo, que consiste en cortar la planta y determinar la biomasa pesando directamente cada componente. Dentro de los indirectos se utilizan métodos en donde se suman los volúmenes de tallo, se toman muestras de ésta y se pesan en el laboratorio para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir, la gravedad o densidad específica (Espinoza, 2007).

El proceso de la cuantificación de la biomasa de un órgano, normalmente requiere el aislamiento de ese órgano del resto de la planta y su desecación en una estufa a una temperatura alrededor de 70 °C hasta deshidratación completa y adquiere peso constante. Este proceso es evidentemente, destructivo y el material que es evaluado ya no puede continuar su crecimiento, razón por la cual en estudios del desarrollo se hacen evaluaciones secuenciadas en plantas diferentes que tienen cierta homogeneidad (Roberts *et al.*, 1988; Esau, 1972).



4. ANTECEDENTES

El uso de humedales construidos para depurar aguas, se ha incrementado durante los últimos veinte años, y en la actualidad han sido opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada (Arias y Brix, 2003). Sin embargo, el proceso de investigación que se requirió para alcanzar resultados óptimos de depuración en estos sistemas ha sido de varios años, y estos se fundamentan en los años 50's.

El primer trabajo experimental realizado para investigar el tratamiento de aguas residuales por plantas de pantano fue llevado a cabo por la Dr. Kathe Sedel en el Instituto Max Planck en Plon, Alemania. Sedel continuó con sus investigaciones, las cuales resultaron eficientes ya que consiguió aportaciones importantes de remoción de sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua (Brix, 1994). No fue, sino hasta 1974 que Othofresen construyera el primer humedal para tratar específicamente aguas residuales (Vymazal *et al.*, 1998). A partir de esa fecha, la construcción de humedales ha ido incrementando, tanto en el norte de América como en Europa.

También en México, la Universidad Nacional Autónoma de México (Facultad de Estudios Superiores Zaragoza) y el Instituto Mexicano de la Tecnología, han realizado grandes aportaciones y avances en su investigación, a continuación se describen algunos trabajos realizados.

- En Pachuca, Hidalgo, Miranda (1999) realizó la evaluación de un sistema de tratamiento biológico incluyendo una fase de lecho de raíces como una alternativa para el tratamiento del efluente del rastro municipal.
- Eugenio y Gallardo (2009) evaluaron la calidad física, química y bacteriológica del agua tratada en un humedal de flujo subsuperficial para uso piscícola proveniente de aguas residuales de una localidad del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo.
- Rosales y Santos (2011) realizaron la caracterización física, química y biológica de aguas residuales para el diseño de humedales de flujo subsuperficial y su producción florística en el municipio de Tetipac en el estado de Guerrero.
- De la Orta y Muñoz (2011) evaluaron la calidad del agua residual y la respuesta fenológica de las plantas ornamentales por medio de un humedal construido de flujo subsuperficial del Centro de Bachillerato Tecnológico y Agropecuario No. 176 del municipio de Apaxtla de Castrejón, Guerrero.
- Zariñana (2011) llevo a cabo el tratamiento de aguas residuales a través de un humedal construido de flujo subsuperficial para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en el campamento de pesca arcoíris, Puebla.
- Seoanéz y Gutiérrez (1999) y colaboradores, han realizado proyectos de Humedales en municipios aledaños al lago de Pátzcuaro, Michoacán.



5. PROBLEMÁTICA

El Campamento de Pesca Arcoíris se ubica en una zona boscosa del municipio de Sta. Rita Tlahuapan el cual recibe un afluente de agua proveniente del arroyo Panacuale (formador del río Atoyac) que se ve afectado debido a que en su cauce lleva aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento, producto de las diferentes actividades que se realizan diariamente en las comunidades aledañas, y en consecuencia repercute en la calidad, lo que limita su uso para la práctica de pesca deportiva. La poca disponibilidad y baja calidad de este recurso y la gran necesidad de las personas que habitan en la localidad, las ha llevado a buscar alternativas para reutilizar este recurso y a su vez puedan generar oportunidades de trabajo.

Las plantas de tratamiento convencionales emplean métodos físicos y químicos los cuales resultan ser eficientes y ofrecen una alta calidad del efluente tratado. Sin embargo, son técnicas costosas que utilizan una gran cantidad de sustancias cuyos residuos pueden causar problemas ambientales y generan lodos residuales de difícil disposición (Eugenio y Gallardo, 2009). Debido a esto, se requiere de un sistema de tratamiento que logre ser compatible con el ambiente y que contribuya con la depuración de aguas residuales para adquirir la calidad de reuso para pesca deportiva acorde a la NOM-003-SEMARNAT-1996.



6. JUSTIFICACIÓN

El arroyo Panacuale es la única fuente hídrica del cual se abastece el campamento de pesca deportiva Arcoíris. Sin embargo, la calidad del agua no es apta para esta actividad, por lo que se requiere de alguna alternativa para mejorar la calidad del agua y poder reutilizarla. Anteriormente, el campamento contaba con una planta de tratamiento de aguas residuales que resultó muy costosa en su operación y mantenimiento, ya que generaba excesivos gastos financieros por la compra de productos químicos y electricidad, ascendían a \$18,000.00 mensuales, y es por ello que el sistema fue abandonado. Sin embargo, en los últimos cinco años, los humedales de flujo subsuperficial han resultado ser sistemas de tratamiento eficientes en los que ocurren diversos procesos físicos, químicos y biológicos, así como una serie de interacciones para la biotransformaciones de compuestos, a través de microorganismos aerobios y anaerobios, albergados en el rizoma de plantas ornamentales y que últimamente han sido empleadas para mejorar la calidad del agua. Las plantas han resultado ser factor determinante en el tratamiento del caudal residual sistema; los costos financieros de operación y mantenimiento del sistema disminuyen hasta en un 90%.



7. HIPÓTESIS

Las plantas ornamentales como platanillo (*Canna indica*), hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) y palma areca (*Dypsis lutescens*) poseen características fisiológicas y anatómicas únicas, que les permite aclimatarse y tolerar altas concentraciones de compuestos de tipo orgánico e inorgánicos que lleva el agua residual en su cauce. Si las plantas en estos sistemas sobreviven y crecen bajo las condiciones anteriormente mencionadas; entonces los contaminantes serán biotransformados en la rizósfera y como resultado se alcanzará la calidad del agua óptima para poder ser vertida de forma segura en los estanques que el Campo de pesca Arcoíris posee y así abastecerse de agua con una mejor calidad hídrica.



8. OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la calidad del afluente del arroyo Panacuale y del efluente tratado en un sistema de humedales construidos, así como la sobrevivencia y adaptación a las condiciones ambientales de la zona de platanillo (*Canna indica*), hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) y palma areca (*Dypsis lutescens*) para determinar el índice de calidad del agua (ICA) que es vertida a los estanques de captación de agua del campamento.

Objetivos Particulares

- Determinar de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1996, la calidad del afluente del arroyo Panacuale y del efluente tratado en un humedal construido de flujo subsuperficial en el campamento de pesca arcoíris.
- Registrar las medidas estructurales de altura de cada individuo: platanillo (*Canna indica*), hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) y palma areca (*Dypsis lutescens*), para estimar la biomasa vegetal generada en el humedal.
- Cuantificar la cosecha de la parte aérea, a través del pesado del material vegetal húmedo y deshidratado (biomasa en peso seco), de cada uno de los ejemplares (Espinoza y Raya, 2011).
- Evaluar la sobrevivencia de las especies en clima semifrío húmedo que son introducidas al humedal, a partir de características sujetas a un determinado tiempo como son: sobrevivencia y crecimiento para compararlos con resultados de zonas de clima semiárido y subhúmedo.
- Analizar los resultados obtenidos y comparar la calidad del afluente – efluente y su relación con la disminución de la concentración de nitratos en el agua.

9. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El campamento de Pesca Deportiva “Arcoíris” se ubica al sureste de la localidad Santa Cruz Otlatla en las coordenadas 19° 22´18.08´´ latitud Norte y 98° 37´26.94´´ longitud Oeste en el municipio Tlahuapan en el Estado de Puebla a 2,640 msnm (INEGI, 2011) y cuenta con un sistema acuático lentic (Figura 10) que posee una anchura de 65,5m y una longitud de 213,13 m, donde se practica el deporte de pesca.

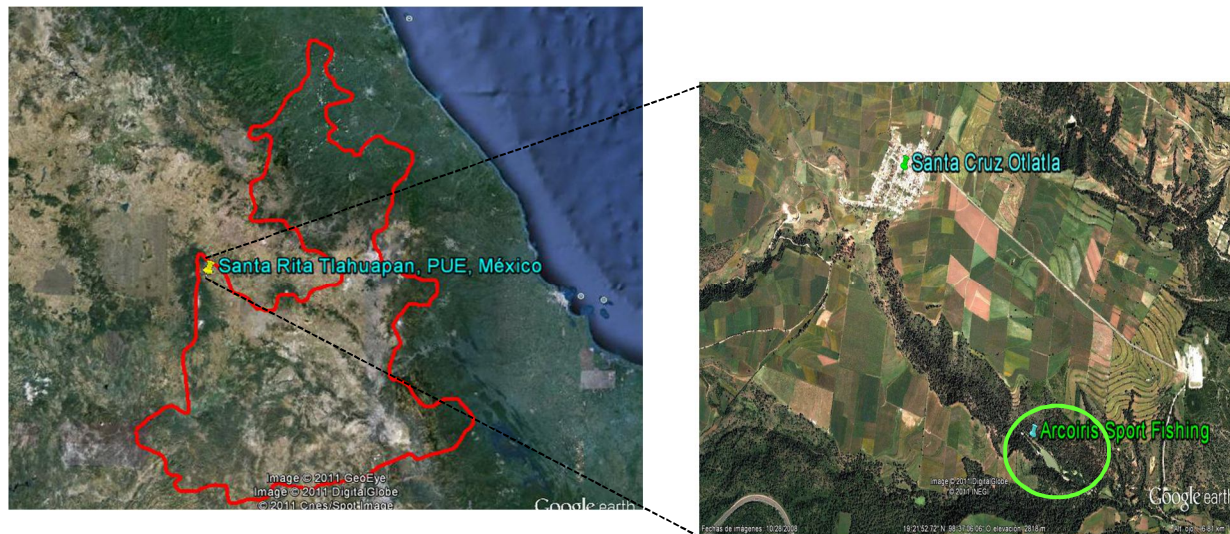


Figura 10. Santa Rita Tlahuapan, Puebla –Campamento de pesca Arcoíris.

Fuente: (Imagen Satelital Google Earth 2011).

Clima

El municipio Tlahuapan presenta tres tipos de clima de acuerdo a la altitud en el rango de los 2,500 a los 4,500 msnm, estos son: el clima semifrío húmedo, el templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, y el templado subhúmedo con verano fresco largo donde se ubica la localidad (Fig. 5) (Lara, 2010).

La temperatura media anual es de 5°C a 12°C, y 3°C a 18°C para el mes más frío y 22°C para el mes más cálido (García, 1998). La precipitación para el mes más seco es de 40 mm; las lluvias de verano y porcentaje invernal van del 5 al 10.2% del total anual (CONAFOR, 2010).



Vegetación

Los principales tipos de vegetación son el bosque de pino-encino, bosque de pino, pastizales y matorral secundario. Entre los ejemplares de pinos se encuentran *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite* y en menor cantidad *P. patula*. También hay otras especies como son: encinos (*Quercus*), ilite (*Alnusjorullensis*), sabino (*Juniperus sp.*), madroño (*Arbutus*), cedro blanco (*Cupressus lindleyi* Klotzsch) entre los principales. El estrato herbáceo se compone de gramíneas como zacatón rastrero y zacatón de raíz (Lara, 2010).

Hidrología

El municipio pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las cuencas más importantes del estado, que tiene su nacimiento cerca del límite de los estados de México y Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra Nevada; por su ubicación se localiza en la parte occidental de la cuenca alta del Atoyac (INAFED, 2009).

Los ríos que atraviesan el municipio, generalmente de oeste a este son formadores o afluentes del Atoyac, destacando los siguientes: Las Rositas, Río Grande, Chautonco y Ayotla; además de gran cantidad de arroyos intermitentes como el Panacuale que se localiza en Santa Cruz Otlatla y que desemboca en el Campamento de Pesca Arcoíris (INAFED, 2009).

Actividades económicas

La actividad económica predominante en la localidad de Santa Cruz Otlatla es la agropecuaria, donde los cultivos principales son el maíz y el frijol; además de que se dedican a la crianza de aves de corral.

Santa Cruz Otlatla es una localidad pequeña que cuenta con aproximadamente 233 viviendas, de las cuales 226 cuentan con servicios públicos; sin embargo, las aguas residuales producto de las actividades humanas son vertidas al Río Otlatla sin tratamiento alguno (INAFED, 2009).



10. MÉTODO

Etapa de gabinete

Se recopiló información bibliográfica sobre la problemática del recurso agua que existe a nivel mundial, nacional y estatal, el funcionamiento de los humedales construidos especialmente de flujo subsuperficial, así como la biología de las plantas ornamentales que en ellos se introdujeron, y finalmente la importancia de la determinación analítica de la calidad del agua con procedimientos estandarizados con base a las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 "que establece los límites máximos permisibles de contaminantes de descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales y la NOM-003-SEMARNAT-1996 " establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público".

Por otra parte, se evaluó el índice de calidad del agua global, el cual se obtuvo a partir del valor obtenido y en función del uso específico para el cual es utilizada el agua (consumo indirecto u ocasional) en base al Rango de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general.

Etapa de campo

El campamento de Pesca Arcoíris cuenta con un sistema de humedales en donde se trata el afluente proveniente del arroyo Panacuale el cual desemboca en varios estanques donde se cría Trucha (*Oncorhynchus mykiss*) (Figura 11).

El Humedal de flujo subsuperficial en que se desarrolló este trabajo está conformado por dos módulos (Figuras 12, 13 y Anexo 1) en los que se recolectaron dos muestras simples (afluente y efluente) del sistema mensualmente, de acuerdo a las normas NOM-003-SEMARNAT-1996 (aguas residuales-muestreo) y NMX-AA-014-1980. (Cuerpos receptores-muestreo), así también se realizaron parámetros *in situ* de temperatura (termómetro), pH (potenciómetro) y alcalinidad (método de indicadores).

Para la determinación de los parámetros restantes como el nitrógeno total, nitritos, nitratos, sólidos suspendidos y disueltos las muestras se trasladaron al laboratorio conservadas en frascos de polietileno de 1 L, y para la determinación de fósforo total, ortosoluble, SAAM y DQO se recolectaron en frascos de polietileno de 1 L agregando como conservador 2 mL H₂SO₄. El Oxígeno se cuantificó conservando la muestra en botellas Winkler de 300 mL, así como para la DBO₅.

Por otra parte, la vegetación fue adquirida de los humedales construidos del estado de Guerrero y otra parte fue comprada en los invernaderos más cercanos; acto seguido se plantó de manera aleatoria sobre el medio granular en distintos periodos durante el tratamiento; en la cual se hizo una excavación de aproximadamente 20 a 25 cm de profundidad para que el rizoma de cada planta quedara completamente sumergido. Así también, se registraron medidas de crecimiento (altura) de cada ejemplar mensualmente (Ver Anexo 4).

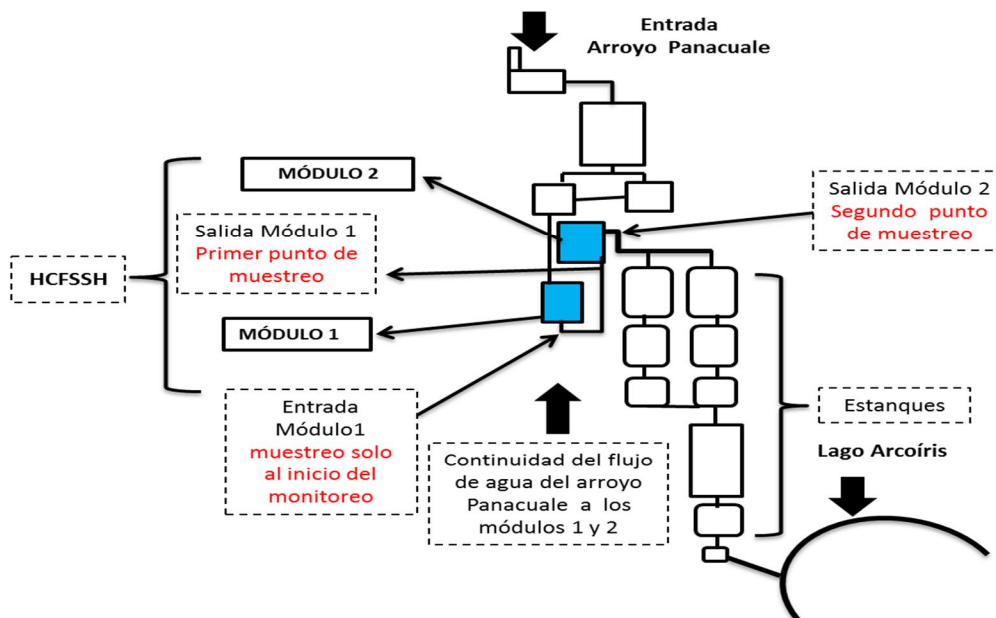


Figura 11. Diagrama completo y puntos de muestreo en el HCFSSH en el Campamento de pesca Arcoíris. Vista aérea.

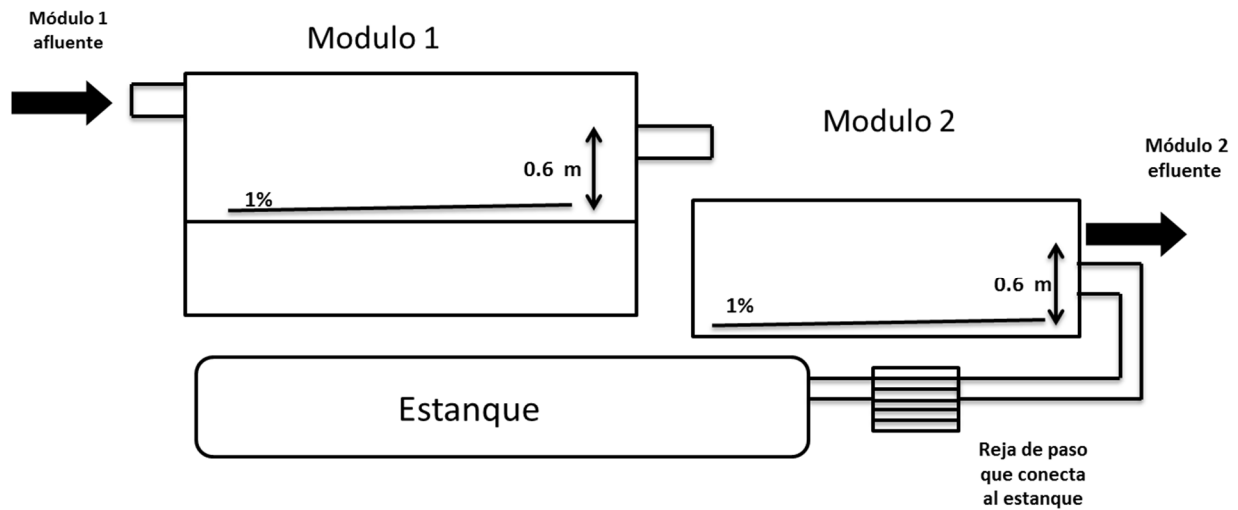


Figura 12. Diagrama del HCFSSH. Vista lateral

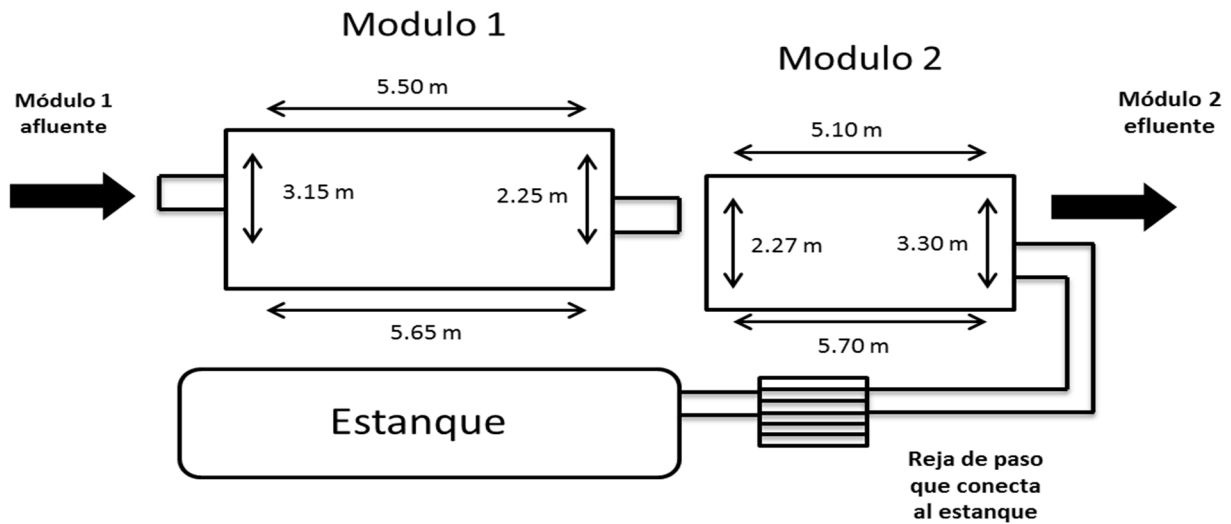


Figura 13. Diagrama del HCFSSH. Vista aérea

Área M1: 19.50 m²

Área M2: 10.90 m²

Etapa de laboratorio

Las muestras de agua trasladadas al laboratorio se refrigeraron a 4°C para su determinación de acuerdo a los siguientes métodos (Cuadro 2).



Cuadro 2. Parámetros de la calidad del agua y técnicas en base a las Normas Oficiales Mexicanas

Parámetro	Método	Referencia
Oxígeno Disuelto	Winkler	NMX-AA-012-SCF1-2001
DBO ₅	Por dilución	NMX-AA-028-SCF1-2001
DQO	Reflujo cerrado	NMX-AA-030-SCF1-2001
Fosforo Total	Fosfovanamolibdato	NMX-AA-029-SCF1-2001
Fosforo Ortosoluble	Cloruro Estañoso	NMX-AA-029-SCF1-2001
SAAM	Colorimétrico Azul de Metileno	NMX-AA-039-SCF1-2001
Nitrógeno Total	Digestión Kjeldahl	NMX-AA-026-SCF1-2001
Nitritos	Ácido Sulfanílico	NMX-AA-099-SCF1-2006
Nitratos	Ácido Fenoldisulfónico	Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos, 1984, FES-Z
Alcalinidad	Método de Indicadores	Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos, 1984, FES-Z

Por otra parte, también se realizó la evaluación de la sobrevivencia vegetal de cada especie instalada en el humedal de acuerdo a lo que Morláns (2004) propone.

Cuadro 3. Características de población, Morláns (2004)

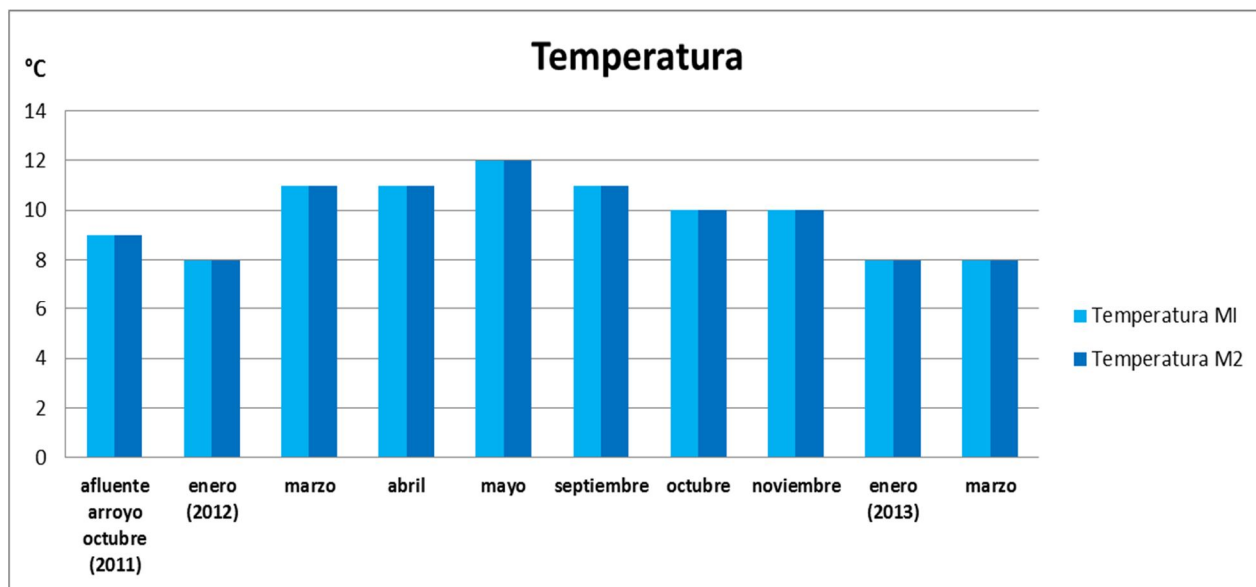
Características de una población		
Estructurales	No. De individuos	Abundancia
		Densidad
Dinámicas (sujetas a un determinado tiempo)	<ul style="list-style-type: none"> • Tablas de crecimiento • Porcentaje de Sobrevivencia 	

Finalmente, la biomasa vegetal se estimó de manera indirecta, para esto fue necesario obtener primero la biomasa seca de varios ejemplares de la especie en cuestión, ésta solo pudo obtenerse mediante un proceso destructivo (Castro *et al*, 1996). En este caso, se realizó de la siguiente manera:

Toma de medidas estructurales por tallo en campo:

- i) Altura: del nivel del suelo hasta la punta de la umbela
- a) Cosecha de la parte aérea de los ejemplares medidos.
- b) Pesado de ejemplares húmedos.
- c) Pesado de ejemplares deshidratados (biomasa en peso seco)

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Grafica 1.

El rendimiento del proceso de tratamiento en los sistemas de humedales construidos es determinante respecto a la temperatura (Silva y Zamora 2005). En condiciones óptimas favorece la biodegradación de compuestos orgánicos e inorgánicos o materia contenida en el agua residual; además influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas y la solubilidad de los nutrientes. (Mogollón *et al.*, 2006).

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece que el Límite Máximo Permisible (LMP) de temperatura del agua para estos sistemas es de 40°C. Las temperaturas registradas durante el día (10:00 a 16:00 horas) en los módulos 1 y 2 (M1 y M2), fueron de 12°C como máxima y 8°C como mínima; en los meses de enero a mayo 2012. En septiembre y octubre se registraron 11° C como máxima y 10°C como mínima, por lo tanto los LMP no fueron rebasados durante el periodo de registro (Gráfica 1).

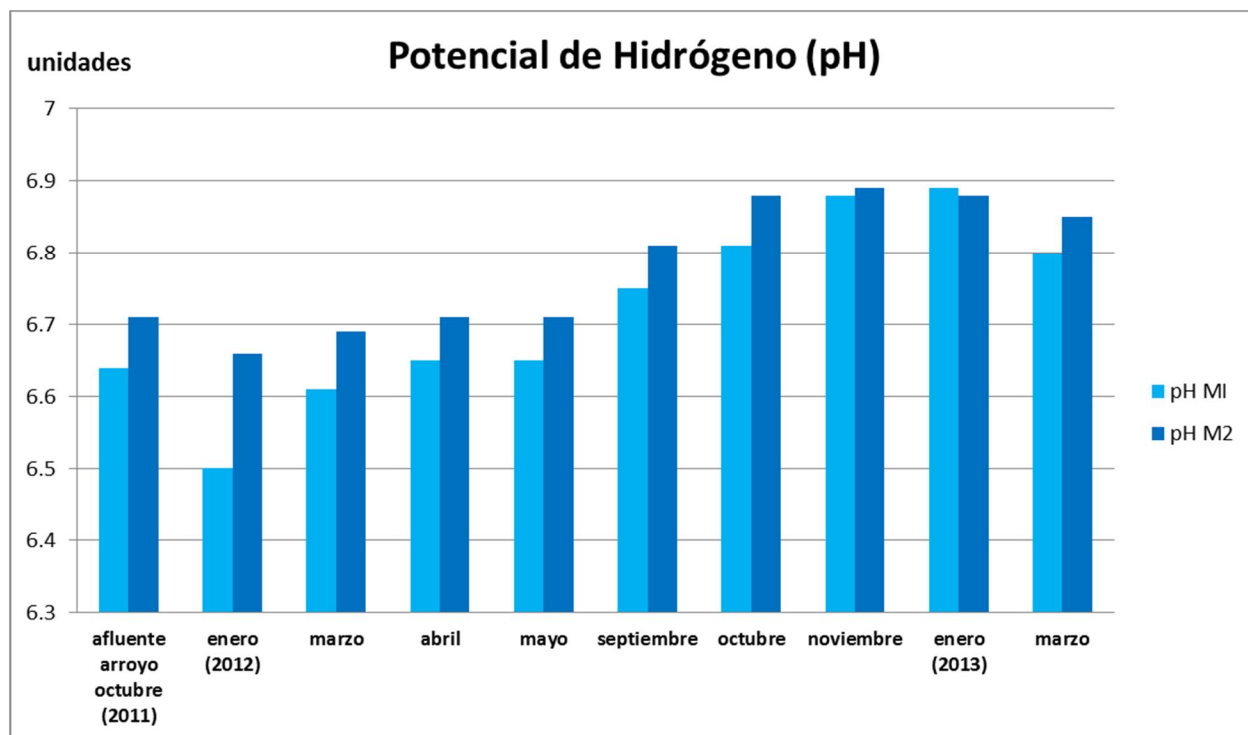
Sin embargo, la temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo bacteriano es de 25 a 35°C, pero cuando la temperatura se acerca a los 50°C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen o cuando la temperatura es menor a 5°C la actividad microbiana se inhibe (Crites y Tchibanoglous, 2000).



Así también, en el campamento de pesca hacen registros de temperatura ambiente durante la noche, ya que es importante para el desarrollo de los organismos y de la vegetación para evitar la pérdida de la parte aérea. En los climas semifríos a fríos como sucede en esta localidad, durante el monitoreo de los meses de invierno, la temperatura ambiente llegó a descender hasta los -8°C , tres grados abajo en comparación con los -5°C que Zariñana (2011) reportó en la misma localidad. Los registros de este parámetro físico que se ha realizado continuamente desde la apertura del Campamento indican que ha sido la temperatura más baja durante los últimos 20 años.

Sin duda alguna, los reportes de temperatura realizados en otras localidades (Guerrero e Hidalgo) no descienden de 18°C . Zurita (2009) y colaboradores, evaluaron la producción florícola en un sistema de humedales y registró como temperatura mínima 18.9°C , De la Orta y Muñoz (2011), evaluaron la fenología y la calidad del agua residual, registraron temperaturas ambientales por arriba de los 20°C , en la zona norte de Guerrero.

Las bajas temperaturas registradas en esta localidad no solo son atribuidas al clima, sino también a la vegetación porque cuando las plantas están desarrolladas, reducen la intensidad de la luz que incide sobre el medio granular. Sin embargo esto también evita que gradientes amplios de temperatura en profundidad puedan afectar el proceso de depuración. En climas fríos la vegetación protege al sistema de la congelación y abatimiento de la biopelícula. (García y Corzo, 2008).

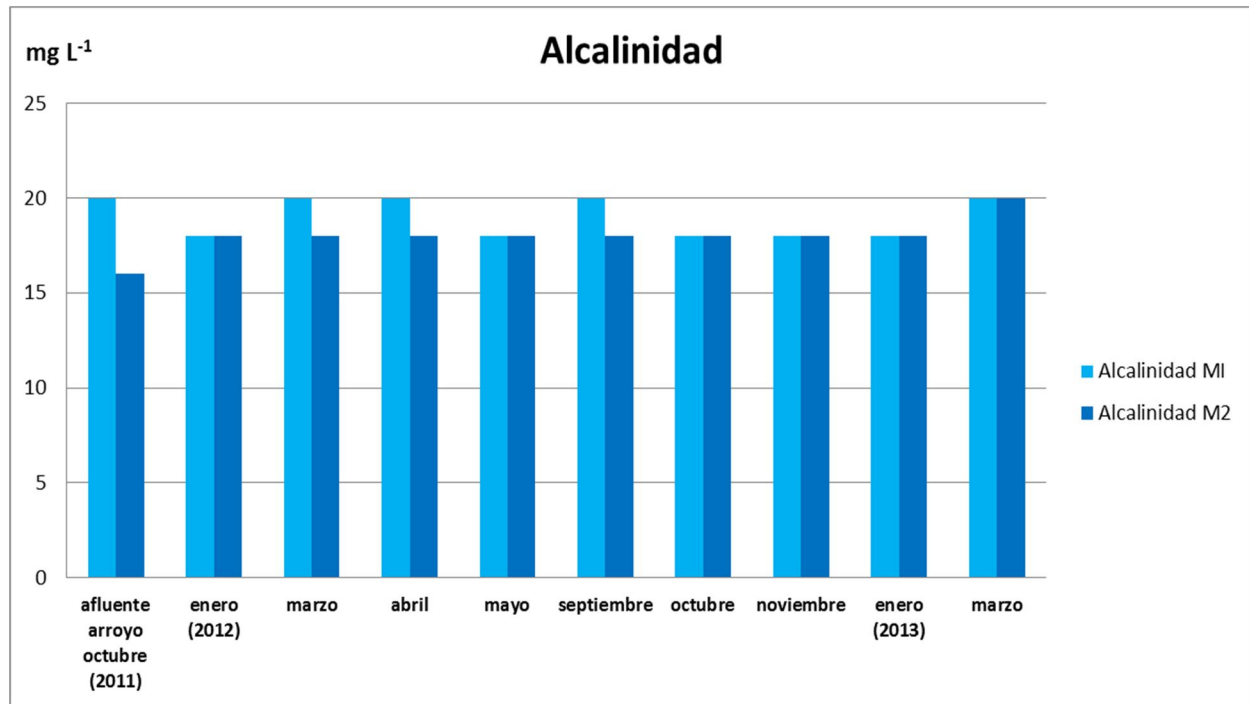


Gráfica 2.

El pH es un parámetro esencial en el tratamiento de aguas residuales, ya que se encarga de controlar diferentes reacciones químicas que se llevan a cabo para la remoción de los diferentes contaminantes. El pH de los cuerpos de agua y el agua residual doméstica, en general es ligeramente alcalino por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos. Los procesos biológicos normalmente se restringen a una escala bastante estrecha de pH, que oscila entre 6.0 y 8.0 unidades (Tebbut, 2002). En descargas industriales es posible encontrar pH ácidos o básicos debido al uso de reactivos químicos (Jiménez, 2002).

APHA (1992) reporta que las aguas naturales registran normalmente valores de pH en el intervalo de 4.0 a 9.0 y con respecto a la vida acuática el intervalo está entre 5.0 y 9.0 unidades.

Los resultados de pH para los módulos 1 y 2 oscilaron durante todo el periodo de muestreo entre 6.5 (enero 2012) a 6.8 unidades de pH (noviembre, enero 2013), principalmente, debido a la cantidad de materia orgánica aportada por los árboles aledaños (hojarasca) (Gráfica 2). Sin embargo, estos resultados no rebasan los intervalos establecidos para la vida acuática. No obstante, la capacidad amortiguadora ante la presencia de materiales ácidos tendrá que ser vigilado de manera continua para un rendimiento óptimo del sistema.

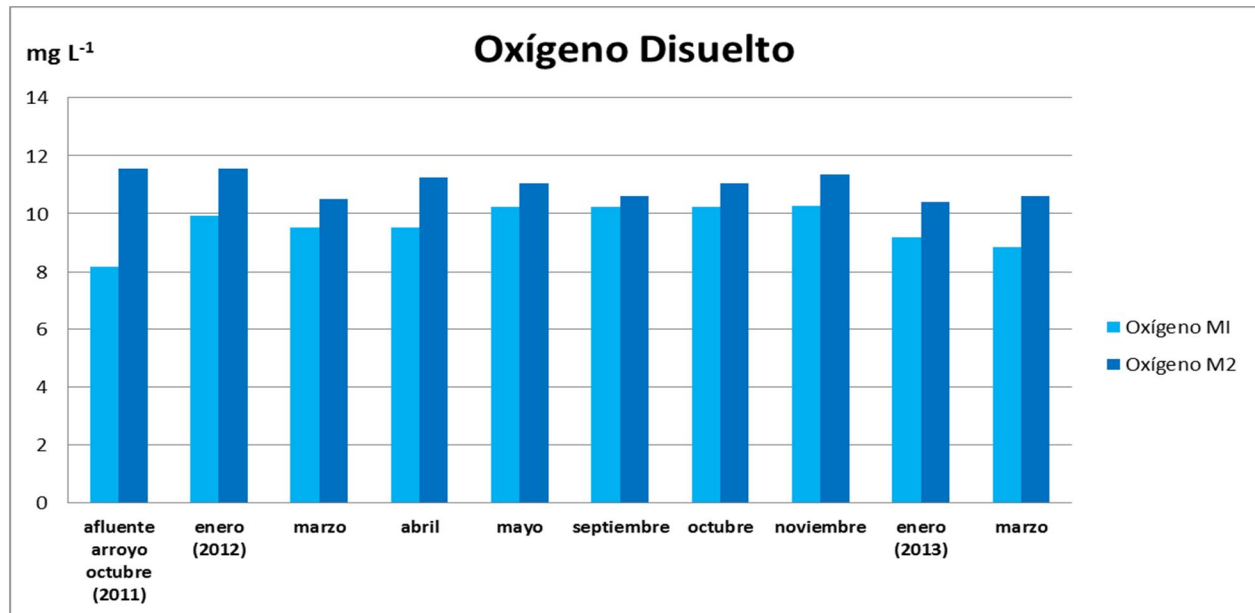


Gráfica 3.

La alcalinidad total es la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad de estar también presentes.

La alcalinidad no sólo representa el principal sistema amortiguador (tampón, buffer) del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva de CO₂ para la fotosíntesis.

Los resultados que se obtuvieron de los módulos 1 y 2 respecto a la alcalinidad total oscilaron entre 16 y 20 mg L⁻¹ de CaCO₃ (Gráfica 3). Internacionalmente es aceptada una alcalinidad mínima de 20 mg de CaCO₃ L⁻¹ para mantener la vida acuática (Kerven, 1989). Sin embargo, cuando las aguas tienen alcalinidades inferiores se tornan muy sensibles a la contaminación, ya que no tienen capacidad para oponerse a las modificaciones que generen disminuciones del pH (acidificación), lo cual se sugiere una vigilancia de las concentraciones de alcalinidad, ya que debajo de 20mg L⁻¹ de CaCO₃ L⁻¹, la actividad biológica cesa.



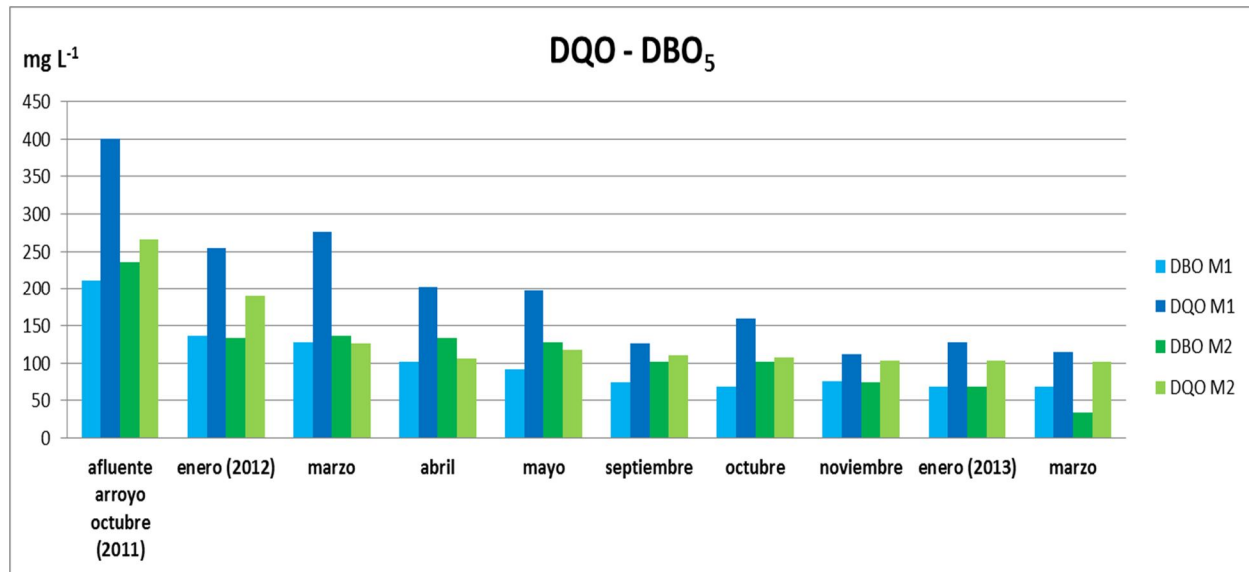
Gráfica 4.

El oxígeno disuelto es una de las determinaciones para la investigación de los ambientes acuáticos ya que provee información importante acerca de las reacciones biológicas y bioquímicas que ocurren en el agua.

Su importancia radica en ser el gas más utilizado para la respiración de los organismos, se sabe que concentraciones menores de 3 mg/L son letales para la supervivencia de los organismos vivos. Otro aspecto importante es el ser un componente necesario para la realización de procesos de óxido-reducción de algunos iones como; nitratos – amonio, ferroso-férrico, y sulfatos sulfitos, también se ha observado que altas concentraciones son tóxicas para la biota.

El ingreso del oxígeno disuelto al sistema en el mes de octubre 2011 fue de 8 mg L⁻¹ en el M1 y 11.5 mg L⁻¹ para el M2. El aporte de oxigenación fue significativo debido a la altura con la que descendía el agua de un módulo al otro; además las concentraciones de oxígeno fueron aumentando gradualmente en ambos módulos, debido al suministro de oxígeno por parte de la vegetación (Mendoza, 2003). Concluyendo con concentraciones de 8.84 y 12.92 mg L⁻¹ en el mes de enero 2013 para M1 y M2 respectivamente (Gráfica 4).

A pesar de que la temperatura descendió en estos últimos meses, la solubilidad del oxígeno y la aclimatación de las plantas fueron favorables al contribuir con las concentraciones de oxígeno necesario para el sistema.



Gráfica 5.

La eliminación de la materia orgánica es muy importante en el tratamiento de depuración de aguas residuales, ya que la contaminación por desechos domésticos o industriales puede agotar el oxígeno en el agua, pues la materia orgánica lo requiere para su descomposición (Roldán, 2003).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua, mediante procesos biológicos aerobios (Rigola, 1990).

La remoción de la materia orgánica sedimentable en los humedales suele ser rápida, debido a la poca velocidad en estos sistemas, la cual es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, y esto depende de las concentraciones de oxígeno disponible. El resto de la DBO₅ se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema. Esta actividad biológica ocurre cerca de las raíces y rizomas pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema (Lara, 1999)

Los resultados indican que la DBO₅ en los módulos 1 y 2 tuvo decrementos significativos durante todo el periodo de muestreo respecto a la concentración del afluyente en el mes de octubre 2011 con 212.11 mg L⁻¹ y 236.05 mg L⁻¹, respectivamente (Gráfica 5). La diferencia de concentraciones iniciales de DBO₅ en los módulos se atribuye a que en el módulo 2 las partes aéreas de los árboles (hojarasca) que se encuentran aledaños al sistema se vieron implicados para contribuir a la concentración de DBO₅, ya que el sistema no contaba con protección alguna de techado para aminorar la influencia de este factor.



Para el módulo 1, durante mayo 2012 se registró una concentración de 92.04 mg L⁻¹, para septiembre 74.04 mg L⁻¹ y octubre 68.02 mg L⁻¹ donde el proceso anaerobio mediante la fermentación metanogénica y sulfato reducción, permitió la reducción significativa en estas concentraciones respecto a la del afluente. El módulo 2, se comportó de manera similar a partir del mes de octubre 2012 con 102.04 mg L⁻¹, enero y marzo 2013 con 68.02 mg L⁻¹ y 34.01 mg L⁻¹ respectivamente (Gráfica 5).

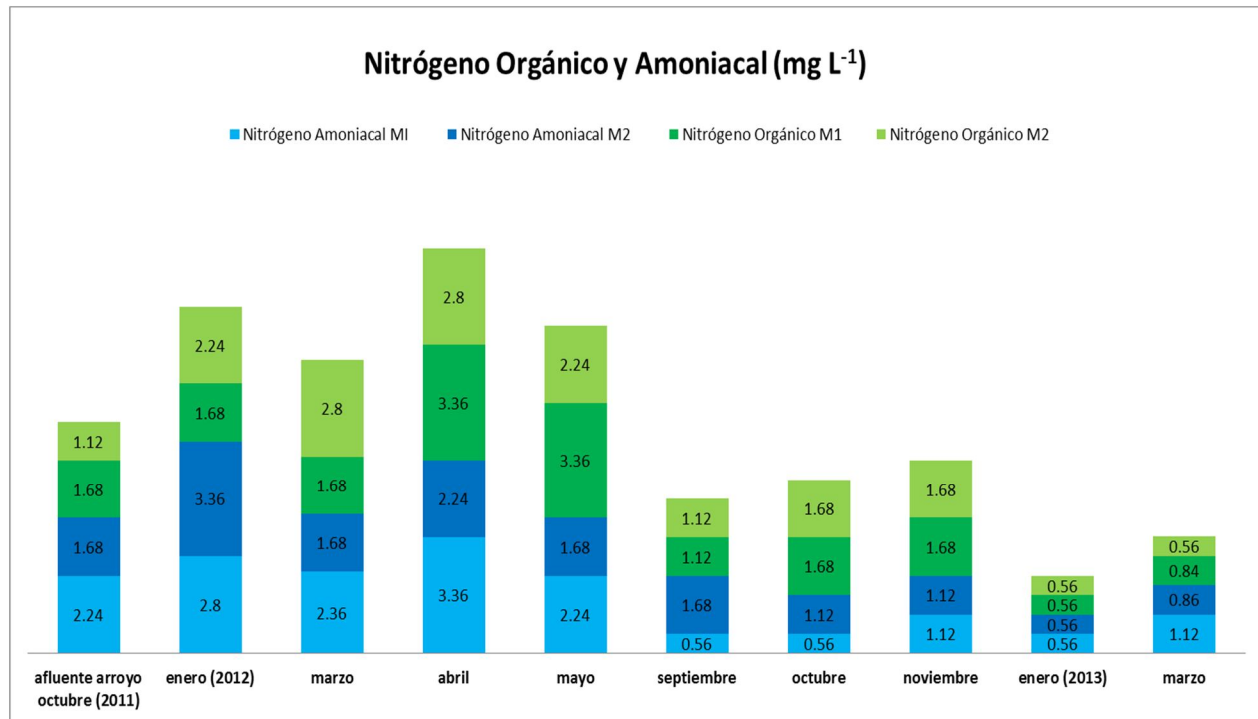
De la Orta y Muñoz (2011) y Zariñana (2011) obtuvieron remociones importantes a partir del cuarto y quinto mes de tratamiento (268 mg L⁻¹ – 160 mg L⁻¹) y (163.11 mg L⁻¹ – 93.01 mg L⁻¹) en climas semiáridas y semifríos respectivamente. Sin embargo, en este sistema la biopelícula alcanzó la maduración hasta el séptimo mes de tratamiento reflejados en los meses de mayo, septiembre y octubre 2012 para ambos módulos. Las bajas temperaturas del ambiente en la zona 0°C a-8° (registros del campamento arcoíris) provocaron que la remoción del sistema fuera más lenta. No obstante las remociones alcanzadas anualmente fueron aceptables, con el 70 y 80% en los módulos respectivamente.

La NOM- 003-SEMARNAT-1996 indica un límite máximo permisible de 30 mg L⁻¹, lo cual se sugiere que se incremente aún más el tiempo de retención hidráulica, a partir de reajustar el cálculo, considerando el flujo y el área, para alcanzar los límites establecidos por la normatividad.

Por otra parte, la DQO es el oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en el agua. Este valor es mayor que la DBO5, ya que en esta solamente se evalúa la que es degradada biológicamente. En condiciones naturales, dicha materia orgánica puede ser biodegradada lentamente por medio de reacciones de oxidación hasta CO₂ y H₂O mediante un proceso que puede tardar unas pocas semanas dependiendo del tipo de materia orgánica y de las condiciones de oxidación-reducción (APHA, 1992).

El afluente descargado en el sistema de humedales en el mes de octubre 2011 registró una concentración de 400 mg L⁻¹ y 266.66 mg L⁻¹ en los M1 y M2 respectivamente, de acuerdo a Metcalf y Eddy (1996) la concentración débil (250 mg O₂ L⁻¹ – 499 O₂ L⁻¹), prevaleció a lo largo del tratamiento, ya que los módulos previos (Figura 11) a estos dos últimos, contribuyeron con la remoción de DQO; siendo así que, entre más bajas sean las concentraciones de este parámetro la calidad del agua aumentará.

Las concentraciones finales de DQO a lo largo de un año no rebasan lo propuesto por Metcalf y Eddy (1996) ya que descendieron a 115.21 mg L⁻¹ vs 400 mg L⁻¹ en el módulo 1 y el módulo 2 finalizó con 102.31 mg L⁻¹ contra los 266.66 mg L⁻¹ representando el 71.19 y 61.6% de remoción respectivamente.



Gráfica 6.

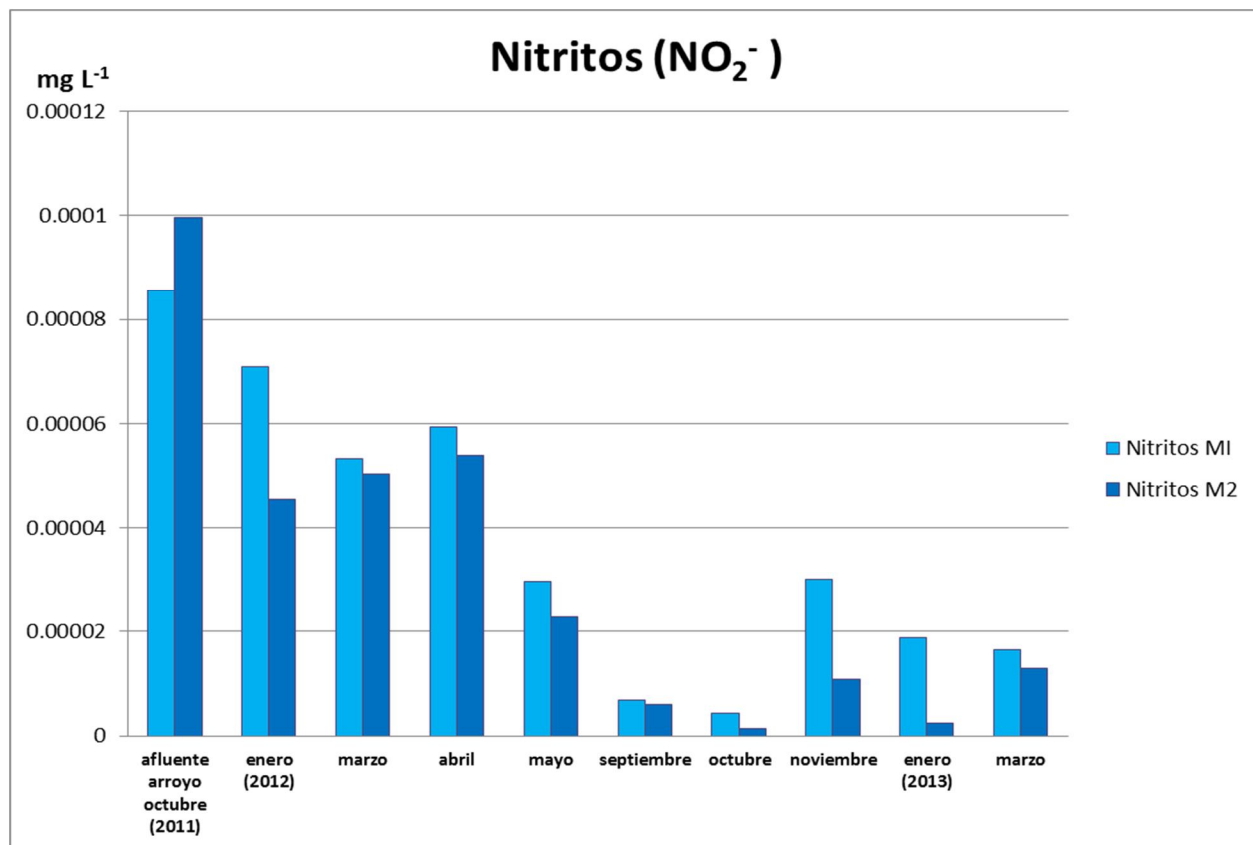
El nitrógeno es esencial para todos los organismos; es parte fundamental de moléculas como proteínas y ácidos nucleicos y es un nutriente indispensable en el crecimiento de organismos fotosintéticos. Por lo general, en el agua se encuentra formando amoníaco, nitritos y nitratos y en las aguas residuales urbanas el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma de amonio (NH₄) y también como nitrógeno orgánico, pero un exceso en este nutrimento puede llegar a ser indeseable, ya que contribuye a la eutrofización de los sistemas acuáticos (APHA, 2007).

En los humedales construidos el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno es de tipo microbiano y comienza con la mineralización del nitrógeno orgánico a la forma amoniacal seguido de la nitrificación en donde se forman los nitritos para dar lugar a los nitratos concluyendo con la desnitrificación en la que el nitrato se reduce a N₂ atmosférico. Sin embargo, también hay otros procesos que contribuyen a la eliminación como la adsorción del amonio y la asimilación realizada por las plantas. En los humedales el ciclo del nitrógeno está acoplado a la del carbono (materia orgánica) fundamentalmente a través de la desnitrificación (García y Corzo, 2008).



La remoción del nitrógeno amoniacal fue lenta, mostrando que hasta el mes de marzo y abril 2012 las concentraciones disminuyeron de manera gradual en ambos módulos. En el módulo 1 logró una remoción total de 48% (1.12 mg L^{-1}) y 49% (0.86 mg L^{-1}) para el módulo 2, respecto a las concentraciones que se registraron al inicio del sistema (enero 2012) con 2.24 y 1.68 mg L^{-1} respectivamente (Gráfica 6). Camargo y Alonso (2007) mencionan que las concentraciones de NH_4 dependen básicamente del pH y la temperatura del agua y a medida que estos factores aumentan la del NH_4 disminuye. Durante el periodo de muestreo la temperatura se mantuvo por debajo de los 12°C , mientras que el pH registró valores de 6.5 a 6.8 , lo cual no impidió que la remoción del NH_4 fuera adecuada. Por otra parte, el nitrógeno orgánico registro remociones del 50% para ambos módulos con concentraciones finales de 0.84 y 0.56 mg L^{-1} (gráfica 6).

Finalmente, el nitrógeno total descendió de 3.92 a 1.96 mg L^{-1} para el módulo 1 y 2.8 a 1.42 mg L^{-1} para el M2 (el cual fue calculado sumando el nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico) en el sistema cumple satisfactoriamente los límites máximos permisibles que la NOM-001-SEMARNAT-1996 propone de 40 mg L^{-1} (gráfica 6).



Gráfica 7.

Los nitritos forman parte del ciclo del nitrógeno, y numerosos estudios han comprobado que su remoción se logra por medio del proceso de nitrificación/desnitrificación (Vymazal, 2002).

Cuando los NO_2^- se presentan en condiciones altas en el agua de consumos la acción tóxica es debida fundamentalmente a la conversión de los pigmentos respiratorios (hemoglobina, hemocianina) en formas que son incapaces de transportar y libera oxígeno (meta-hemoglobina, meta-hemocianina), lo cual puede causar asfixia y en último término la muerte.

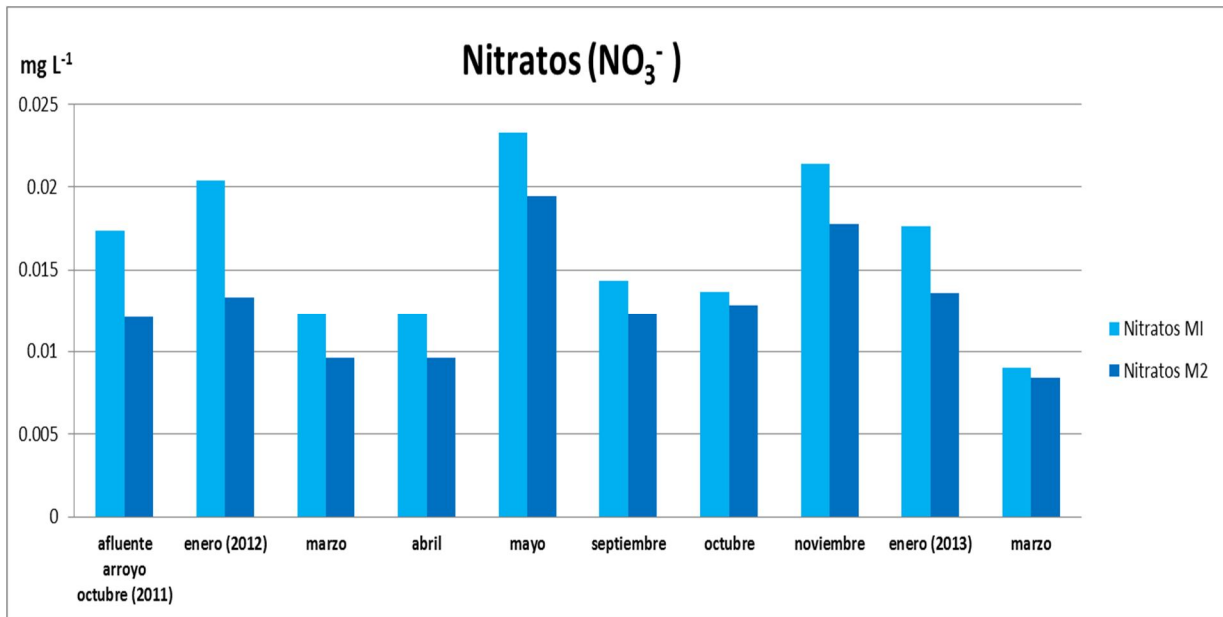
Los nitritos son solubles en agua y se transforman naturalmente a partir de los nitratos, ya sea por oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en los sistemas acuáticos o por la reducción bacteriana (APHA, 2007). El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se encuentra en cantidades significativas de baja oxigenación. (Zúñiga, 2004). Las concentraciones relativas de NO_2^- dependen básicamente de la temperatura y el pH del agua, ya que a través de estos parámetros las bacterias del género *Nitrosomonas*, las cuales convierten el nitrógeno amoniacal a nitritos por medio de una reacción de oxidación. (Camargo y Alonso, 2007).



La remoción de NO_2^- en el módulo 1 y 2 fue lenta, pero significativa al final del monitoreo en marzo 2013 (módulo 1 $1.64 \times 10^{-5} \text{mg L}^{-1}$ y $1.29 \times 10^{-5} \text{mg L}^{-1}$ en el módulo 2) respecto al influente caracterizado en octubre 2011 ($8.5 \times 10^{-5} \text{mg L}^{-1}$ para el módulo 1 y $9.95 \times 10^{-5} \text{mg L}^{-1}$ para el módulo 2) (Gráfica 7).

La temperatura y el pH fueron bajos durante el periodo de muestreo, en los meses de octubre 2011, enero y abril 2012, las concentraciones de NO_2^- se lograron mantener, el sistema llevó a cabo de forma muy lenta los procesos de biotransformación, por lo que la producción de nitritos se mantuvo. El pH siempre se mantuvo dentro de los intervalos 6.5 y 6.8 donde la nitrificación aun logra ejecutarse sin problema alguno. Por debajo de los 6.5 este proceso se inhibe y a pH menor a 6.0 el proceso cesa por completo.

La temperatura mínima que se requiere para la transformación a NO_2^- es de 8°C a 10°C . Sin embargo, durante la noche, la temperatura del ambiente descendía por debajo de los 0°C y a su vez también descendía la temperatura del agua, afectando los procesos de remoción de las bacterias nitrificantes ya que son sensibles a bajas temperaturas (Granados y Villaverde 1997). No fue hasta el mes de mayo 2012 que los nitritos lograron descender, ya que la temperatura y el pH fueron óptimos para la biotransformación y el proceso se llevó a cabo de manera lenta pero adecuada, logrando evitar que las formas tóxicas en el agua prevalecieran (Trinidad, 2006).



Gráfica 8.

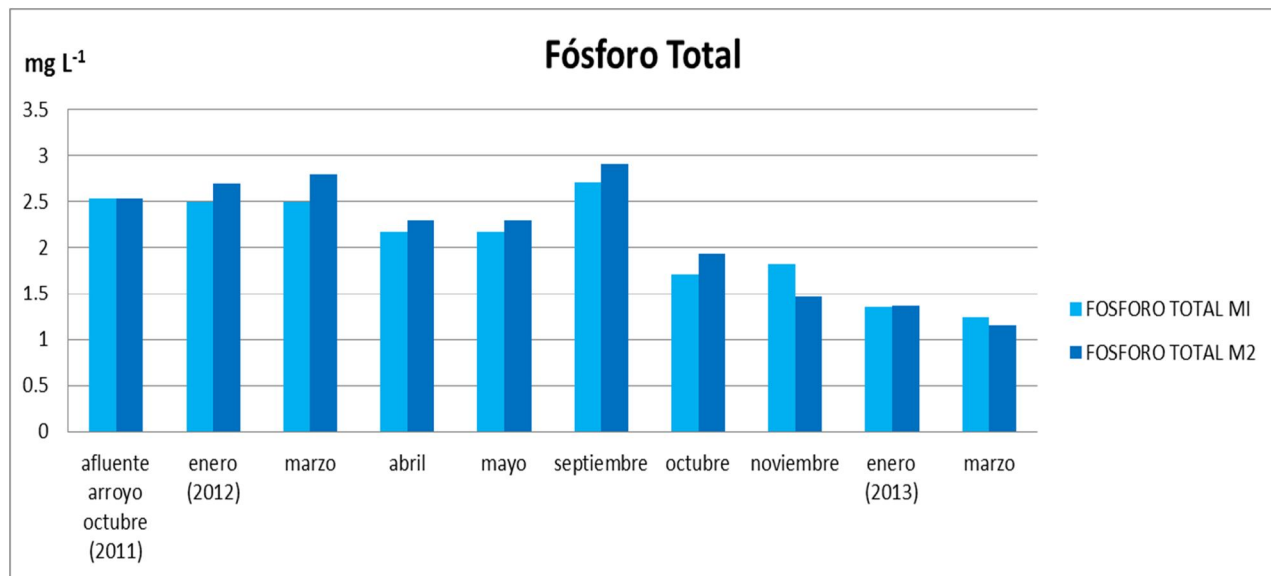
Lo mismo que en el caso de los nitritos NO_2^- , la acción tóxica de NO_3^- es debida básicamente a la conversión de los pigmentos respiratorios en formas que son incapaces de transportar y liberar oxígeno. Sin embargo, el nitrato presenta una menor toxicidad que el nitrito como resultado de su baja permeabilidad branquial, lo cual hace que su absorción a través de las branquias sea más limitada (Camargo y Alonso, 2007).

En los humedales construidos, la condición limitante para el proceso de nitrificación es la disponibilidad de oxígeno, la cual está relacionada con la eficiencia de la transferencia de oxígeno a las raíces de las plantas. Es importante que la profundidad del humedal no supere los 0.6 m, ya que el flujo bajo la zona de las raíces es anaerobio y la nitrificación en esta zona no será posible si la profundidad es mayor. El género *Nitrobacter* es el encargado de la oxidación de nitrito a nitrato, el cual queda disponible para ser absorbido por las plantas. Los nitratos es la forma en la que las plantas pueden absorber este elemento y sintetizar sus proteínas por medio de la fotosíntesis (Romero *et al* 2009).

Los nitratos en el módulo 1 y 2 muestran cantidades bajas a lo largo del proceso, sin embargo, en el mes de mayo 2012 los NO_3^- aumentaron su concentración a $0.0232263 \text{ mg L}^{-1}$ y $0.0194369 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente, viéndose reflejado con el crecimiento significativo de las plantas instaladas en el humedal.

En los meses más fríos noviembre 2012, enero y parte de marzo de 2013 la concentración de NO_3^- descendió debido a las bajas temperaturas en el agua de 8°C y al pH que osciló entre 6.5 y 6.8.

Ante estos resultados las plantas mantuvieron el ritmo de crecimiento, sin embargo la presencia de partes aéreas como flores y nuevos retoños indican que los nitratos son suficientes para el desarrollo de estas con concentraciones de $0.009021 \text{ mg L}^{-1}$ para el módulo 1 y $0.008338 \text{ mg L}^{-1}$ para el módulo 2 (Gráfica 8) (Taiz y Zeiger, 2002). Por otra parte, los factores de temperatura y pH nuevamente no han repercutido de manera importante para el crecimiento de la vegetación y a la vez se logra completar el ciclo del nitrógeno resultando de la reacción N_2 que se desprende a la atmósfera.



Gráfica 9.

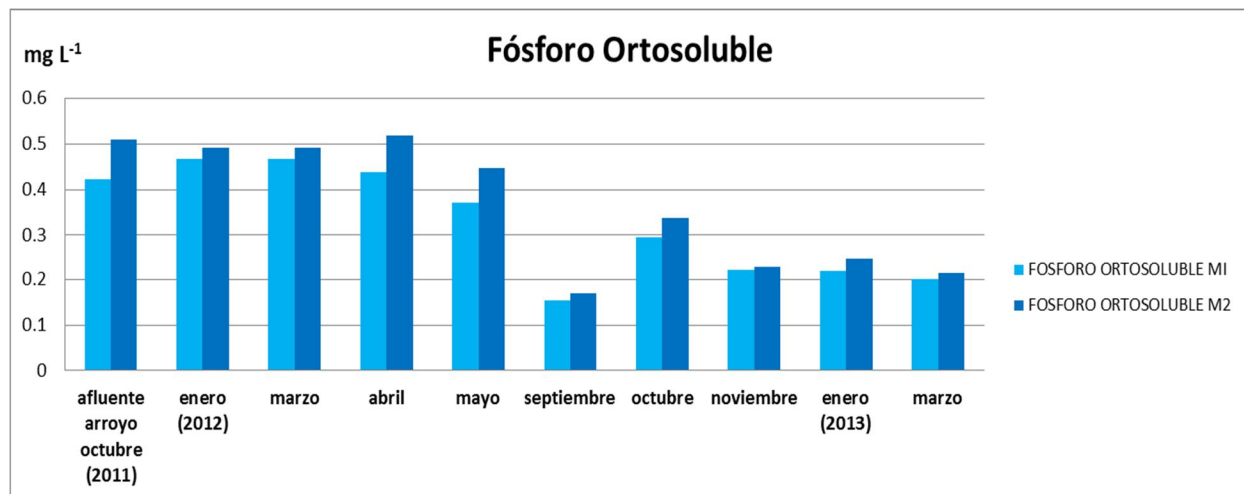
El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser el nutriente limitador de la productividad primaria de un cuerpo de agua. Los organismos utilizan fosfato como nutrientes en el tratamiento de aguas residuales por procesos biológicos. (Ramos *et al*, 2003).

El fósforo se encuentra en las aguas naturales y residuales casi exclusivamente en forma de fosfatos clasificados en ortofosfatos.

En los humedales construidos los principales procesos de remoción del fósforo son la adsorción, sedimentación, precipitación química y asimilación por parte de la vegetación. El sedimento orgánico es un elemento fundamental en el proceso de depuración, ya que sirve de sustrato para el crecimiento de los microorganismos; jugando un papel fundamental en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación es su adsorción a las arcillas, la precipitación y formación de complejos con Al, Fe y Ca presentes en los sedimentos (Agustín, 2008).

En abril y mayo de 2012 la remoción del fósforo no fue significativa, ya que en el módulo 1 alcanzó 13% (afluente 2.49 mg L^{-1} y 2.17 mg L^{-1} en el efluente) y el módulo 2 el 25% (afluente 3.10 mg L^{-1} y 2.30 mg L^{-1} en el influente) (Gráfica 9). En este tipo de sistemas el medio granular limpio, tiene la capacidad de adsorción, pero ésta se va perdiendo rápidamente y los procesos son más limitados en la asimilación por parte de la vegetación (Romero, 2009).

No obstante, la NOM-001-SEMARNAT-1996, establece como límite máximo permisible 60 mg L^{-1} de fósforo total para aguas residuales, por lo que el agua tratada en el humedal cumple satisfactoriamente esta normatividad con concentraciones finales de 1.238 mg L^{-1} y 1.156 mg L^{-1} para los módulos 1 y 2, respectivamente.



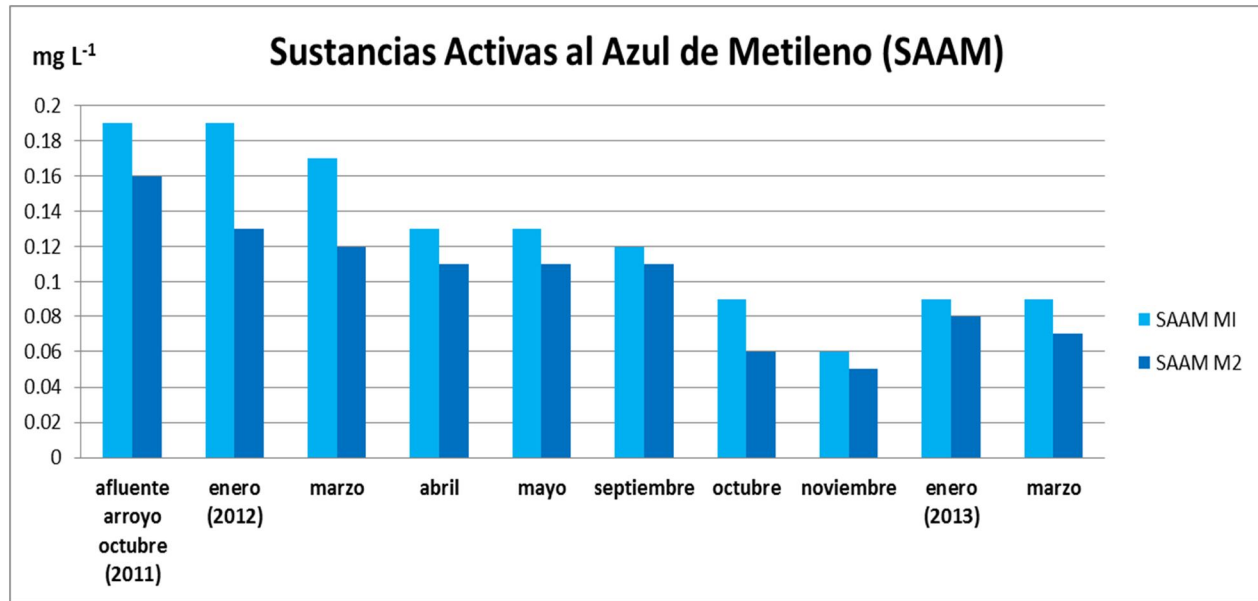
Gráfica 10.

El fósforo es un elemento constitutivo importante y necesario del protoplasma, el cual tiende a circular a través de la descomposición de los compuestos orgánicos hasta acabar en fosfatos, que quedan nuevamente a disposición de las plantas (Odum, 1972)

El fósforo ortosoluble en el módulo 1 presentó una concentración de $0.42206 \text{ mg L}^{-1}$ en el mes de octubre 2011 y en el módulo 2 una concentración de 0.5088 mg L^{-1} , durante el proceso de maduración en los meses de mayo 2012 las concentraciones descendieron a 0.370 mg L^{-1} y 0.153 mg L^{-1} con remociones del 58% para el módulo 1 y para el mes de septiembre los valores oscilaron entre y 0.4463 mg L^{-1} y 0.1703 mg L^{-1} removiendo el 61% en el módulo 2 (Gráfica 10).

La remoción se vio favorecida por los mecanismos que ocurrieron dentro del sistema: la adsorción, sedimentación, precipitación química y asimilación por parte de la vegetación en

donde una porción mínima quedo solubilizada en el sistema en forma de ortofosfatos (Delgadillo, 2010), la cual fue tomada por las plantas resultando al final del monitoreo concentraciones de 0.2003 mg L^{-1} y 0.2134 mg L^{-1} .



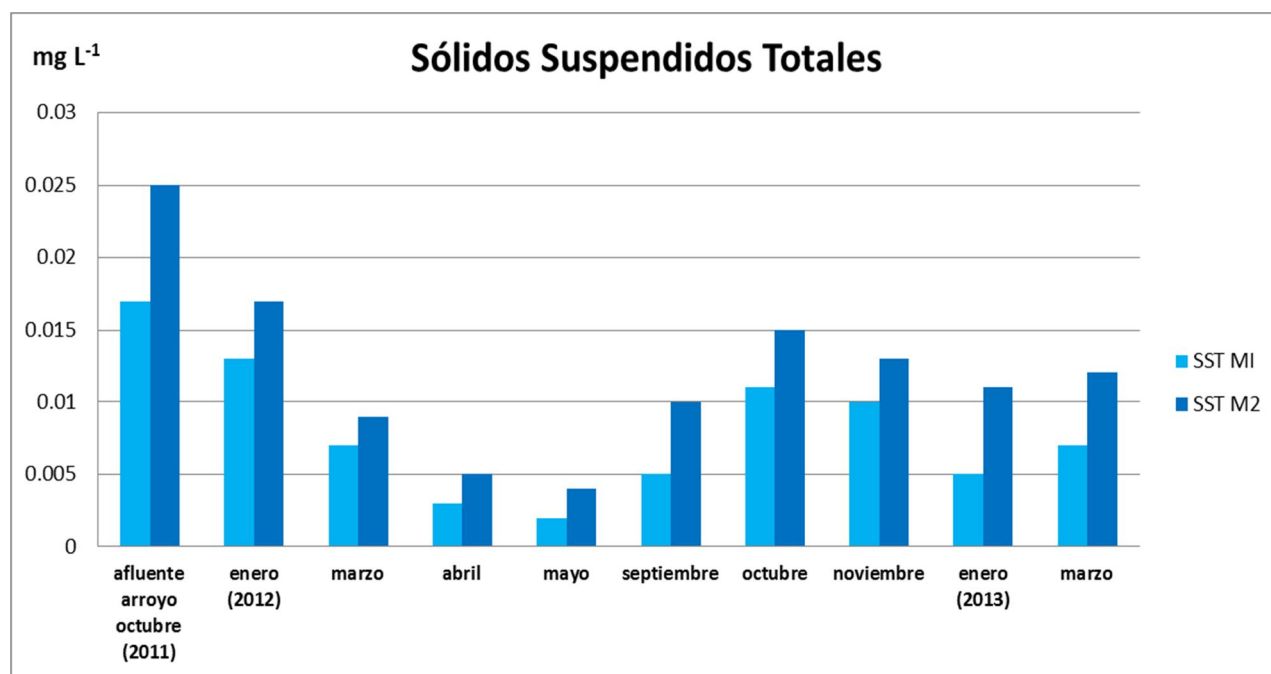
Gráfica 11.

Los componentes básicos de los detergentes, son los compuestos orgánicos con propiedades tensoactivas en solución acuosa. Los compuestos tensoactivos son más usados en la fabricación de detergentes, son los sulfanatos de alquil benceno de sodio (ABS), los sulfanatos de alquil tolueno (ATS) y sus mezclas, cuyas estructuras químicas ramificadas son muy estables y no se degradan, o lo hacen muy lentamente. Son muchos los efectos causados por un alto contenido de detergentes en agua, tales como formación de espuma, la alta toxicidad de los surfactantes contenidos, que representan un serio peligro a la vida acuática y los fosfatos que propician el crecimiento desmesurado a la flora acuática. (APHA, 1992).

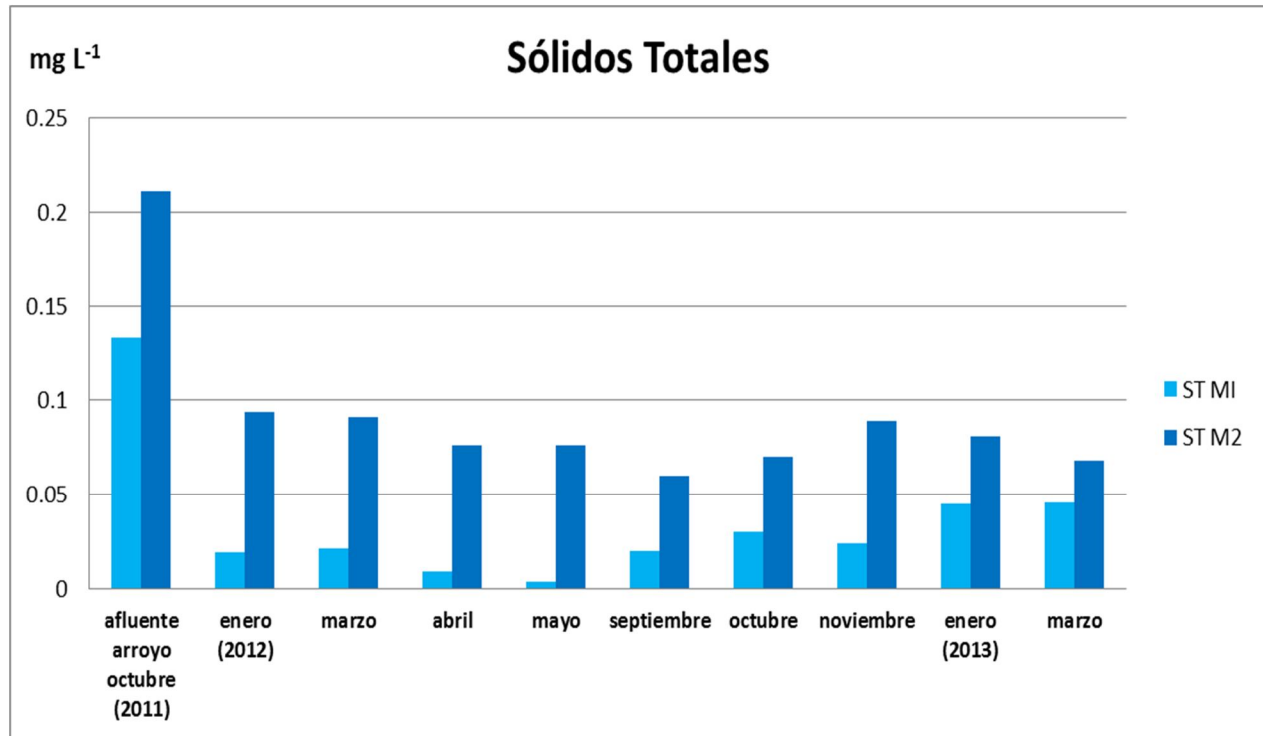
Los resultados obtenidos para SAAM en octubre 2011 del afluyente al módulo 1 fueron de 0.19 y 0.16 mg L^{-1} para el módulo 2. Las remociones significativas se reportaron en los meses más calurosos de abril y mayo con 0.13 y 0.11 mg L^{-1} con una remoción respecto al afluyente del mes de octubre de 31% para ambos módulos, aunque la remoción fue buena en ambos módulos, los límites máximos permisibles de 1.0 mg L^{-1} fueron rebasados, debido a que el influente tratado es contaminado por aguas de uso doméstico. Sin embargo, las concentraciones lograron cumplir los límites máximos permisibles hasta el mes de octubre 2012, finalizando el monitoreo en marzo de 2013, con concentraciones de 0.09 y 0.07 mg L^{-1} para módulo 1 y 2 respectivamente (Gráfica 11).



Las SAAM incorporadas a las corrientes de los humedales son aportadas principalmente por las descargas de agua residual doméstica, la importancia de evaluar este parámetro es debido a que la presencia de jabones contribuye a la formación de espumas las cuales impiden el contacto aire y agua, por lo tanto no hay una buena oxigenación, y en consecuencia puede facilitar la disolución de sustancias que anteriormente no eran tan solubles, de esta forma se aumenta la sensibilidad de un cuerpo receptor a ser contaminado. Sin embargo los resultados obtenidos no superan los límites máximos permisibles establecidos, por lo tanto no se considera problema de contaminación.



Gráfica 12.



Gráfica 13.

Los parámetros físicos dan una idea aproximada de la calidad del agua residual, del proceso que se realiza y de los posibles problemas existentes en el tratamiento.

Uno de estos parámetros que determinan la calidad física son los sólidos. Los sólidos totales son la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a una temperatura entre 103 °C y 105 °C hasta evaporar (Da Cámara *et al.*, 2003). Por otra parte, los sólidos suspendidos en los cuerpos receptores varían según el tamaño y naturaleza; pero que desde un punto de vista general, los efectos más notables son: interferencia con la penetración de la luz solar (turbiedad) y el azolve de los cuerpos de agua (Delgadillo, 2010). Los sólidos se dividen de acuerdo a su densidad y características con el medio receptor.

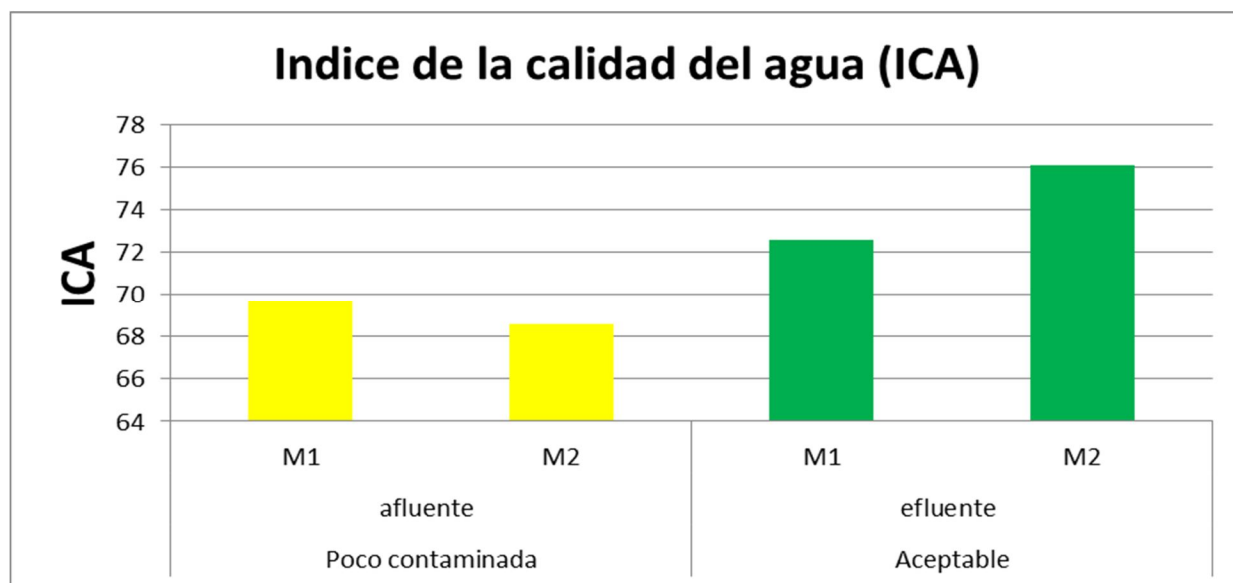
Los resultados que se obtuvieron de los sólidos suspendidos del influente a tratar en el mes de octubre 2011 para el módulo 1 fue de 0.017mg L⁻¹ y para el módulo 2 0.025 mg L⁻¹ (Gráfica 12).

La remoción significativa respecto a la del afluyente inicial se presentó durante abril con 0.003 mg L⁻¹ para el módulo 1 y 0.005 mg L⁻¹ en el módulo 2, ambos módulos con casi 80% de remoción, y en el mes de mayo 2012 con una concentración de 0.002 para el módulo 1 y 0.004 mg L⁻¹ para el módulo 2.



Los sólidos suspendidos en el humedal se removieron por medio de las plantas, las cuales funcionan como trampas de sedimentos, y a su vez limitan la resuspensión del material particulado. (Llagas y Guadalupe, 2006). La concentración de sólidos suspendidos al final del monitoreo en el mes marzo 2013 fue de 0.007 y 0.012 mg L⁻¹ para el módulo 1 y módulo 2 respectivamente.

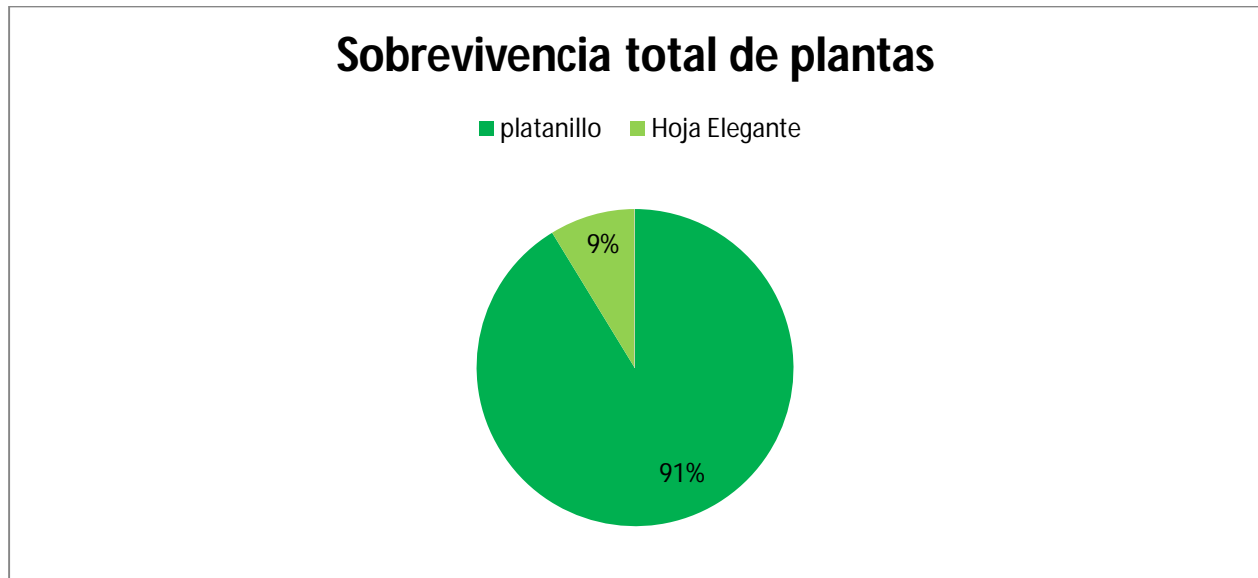
Finalmente, la concentración de los sólidos totales en los módulos 1 y 2 no rebasaron los límites máximos permisibles de 30 mg L⁻¹ que la NOM-003-SEMARNAT-1996 propone, ya que los resultados obtenidos en el mes de marzo 2013 fueron de 0.046 en el módulo 1 y 0.068 mg L⁻¹ para el módulo 2 con remociones finales de 65 y 67% respectivamente (Gráfica 13).



Gráfica 14.

De manera general, de acuerdo a los rangos de clasificación del ICA (Tabla 1), la calidad el agua del efluente tratado a través del sistema de humedales de flujo subsuperficial es de tipo "aceptable" (color verde) para los módulos 1 y 2 con 72.5940y 74.6986 de agua pura respectivamente, el resto son compuestos externos a la matriz hídrica, ya que la remoción de los diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua de tratamiento fue buena, en comparación con la calidad que presentaba el afluente al inicio del tratamiento "poco contaminada" (color amarillo) con 60.6573 para el módulo 1 y 68.5885 para el módulo 2 (Gráfica 14). Pese a las dificultades climáticas de la zona como principal factor en el tratamiento, la aclimatación de la vegetación junto con los mecanismos de remoción que se llevaron a cabo en los módulos permiten destacar la importancia que tienen estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales.

RESULTADOS CRECIMIENTO VEGETAL



Gráfica 15.

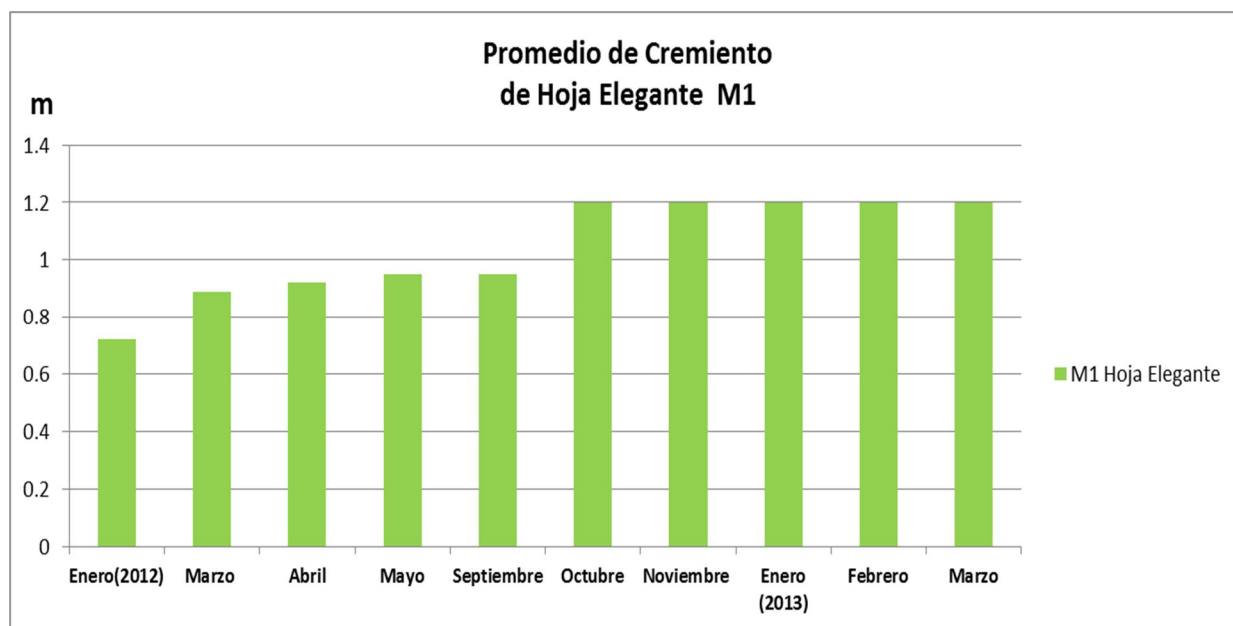
Los resultados obtenidos de las plantas ornamentales instaladas en el sistema de humedales de flujo subsuperficial en los módulos 1 y 2 fueron los siguientes:

El porcentaje de sobrevivencia de las especies instaladas en los módulos 1 y 2 indica que platanillo (*Canna indica*) obtuvo el porcentaje de sobrevivencia más alto con el 91% del total de las 3 especies, con un total de 52 plantas vivas. Para hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) se obtuvo el 9% de sobrevivencia con solo 5 plantas de las 10 que se plantaron en el transcurso del tratamiento (Gráfica 15). El factor limitante para la baja sobrevivencia de esta especie fue el estrés, ocasionado por la temperatura con registros por debajo de 0°C durante los meses de noviembre 2012 y enero 2013; el daño en las hojas que conforman la parte aérea de esta especie se observó en el color y tamaño (Figura 14).

Finalmente, palma areca (*Dyopsis lutescens*), no logró la sobrevivencia, pese a que podía tolerar temperaturas de -2°C sufrió muerte total de la parte aérea (Figura 14). Lo anterior indica que las condiciones climáticas repercuten significativamente en la vegetación e inciden en la aclimatación de las especies vegetales.



Figura 14. Imágenes del daño en las plantas a causa de las bajas temperaturas ambientales. Hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) y Palma areca (*Dypsis lutescens*)



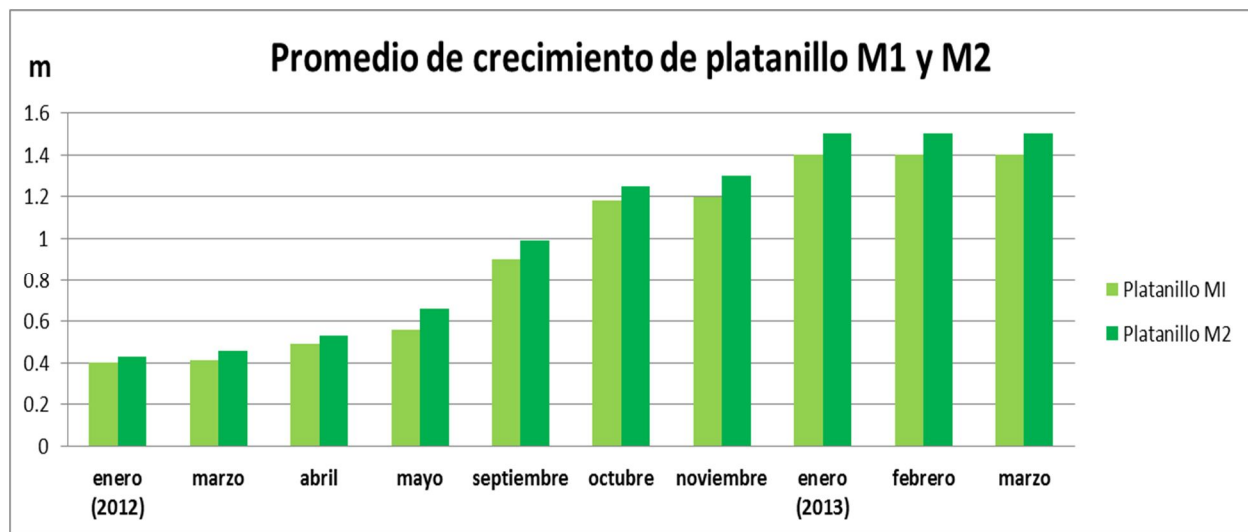
Gráfica 16.

La especie *Xanthosoma sagittifolium* (hoja elegante), fue plantada específicamente en el módulo 1, debido a que los rayos del sol ingresaban con un poco más de intensidad en comparación con el módulo 2, lo que benefició el desarrollo de esta especie (Gráfica 16). Sin embargo, el crecimiento de hoja elegante evidentemente fue lento ya que alcanzó su máximo crecimiento hasta el mes de octubre 2012, lo que equivale a 10 meses, donde la disponibilidad de nitratos fue adecuada ya que alcanzaron una concentración de $0.0136879 \text{ mg L}^{-1}$ para el módulo 1.



En el mes de noviembre, se colocó un techado al sistema a base de lona tipo invernadero, para evitar el impacto de las heladas en los meses noviembre 2012 y enero y parte de febrero 2013, lo que favoreció a la vegetación ya que el impacto del choque térmico no fue directo.

Trabajos anteriores como el De la Orta y Muñoz (2011) en sistemas de humedales de flujo subsuperficial generaron biomasa en peso húmedo de 12.56 Kg con esta misma especie al término de 6 meses en climas semiáridos y subhúmedo. Sin embargo, la aclimatación de esta especie fue complicada durante el periodo de tratamiento, ya que las bajas temperaturas en el agua y los intervalos de pH en el afluente limitaron el crecimiento de esta especie al generar una biomasa en peso húmedo de solo 4.550 Kg y una biomasa en peso seco de 1.665 Kg al final de 1 año y dos meses (Cuadro 4).



Gráfica 17.

La especie (*Canna indica*) platanillo plantada en los módulos 1 y 2 logró una sobrevivencia y crecimiento significativo. Al inicio del trasplante, las especies midieron aproximadamente 40 cm en promedio.

En el módulo 1 el crecimiento de platanillo fue de 35 cm sobre la altura inicial en el mes de mayo 2012, para septiembre de 2012 aumentó 19 cm en cuatro meses y finalmente en el mes de noviembre 2012 la altura máxima alcanzó 1.4 m. En el módulo 2 durante el mes de mayo 2012 esta especie tuvo un crecimiento de 33 cm alcanzó una altura de 56 cm, para el mes de septiembre aumentó 35 cm más, finalmente en noviembre registró una altura de 1.5 m, aumentó 2 cm (Gráfica 17).



A partir de ese mes, fue evidente que el crecimiento de las plantas se inhibió, ya que en el mes de marzo 2013 los registros de crecimiento no aumentaron y esto repercutió al generar una biomasa en peso húmedo de 5.400 Kg y una biomasa en peso seco de 2.505 Kg Sin embargo, la presencia de flores y pequeños retoños en las mismas plantas, indican que esta especie ha logrado establecerse de manera satisfactoria y que la concentración de nitratos es suficiente para el desarrollo de las plantas.

De la Orta y Muñoz (2011) quienes trabajaron con esta misma especie en un clima semiárido y subhúmedo mencionan que es una especie que se aclimató muy bien a esas condiciones generando biomásas en peso húmedo de 119.95 Kg y 142.509 Kg (Cuadro 4). La capacidad de que platanillo (*Canna indica*) haya logrado establecerse en un clima completamente opuesto, es debido a sus características fisiológicas en donde esta planta puede aclimatarse gradualmente a bajas temperaturas, aumentando el contenido en lípidos insaturados en sus membranas y previniendo la formación de cristales de hielo mediante la síntesis de proteínas anticongelantes (Campell y Reece, 2007).

Cuadro 4. Biomasa en peso húmedo generada en dos diferentes tipos climas.

Clima	Módulos	<i>Canna Indica</i>	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Tiempo
Clima semiárido subhúmedo	M1	119.958 Kg	12.56 Kg	5-6 meses
	M2	142.509 Kg		
Clima semifrío	M1	4.55 Kg		12 meses
	M2	5.4 Kg	-----	



12. CONCLUSIONES

Las concentraciones finales de los parámetros físicos y químicos registradas en los módulos 1 y 2 del sistema de humedales de flujo subsuperficial, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de la NOM- 003-SEMARNAT-1996, excepto la DBO_5 , que se encuentra ligeramente por arriba de lo establecido con concentraciones de 68 mg L^{-1} y 34.01 mg L^{-1} , respectivamente.

La temperatura del agua osciló de 8 a 10°C y el pH entre 6.6 y 6.9 unidades, por lo que el funcionamiento del sistema respecto de estos parámetros fue adecuado.

La eficiencia de la remoción de materia orgánica contenida en el agua residual logró llevarse a cabo aproximadamente en un año, la temperatura del ambiente fue fundamental para que los procesos de biotransformación fueran lentos.

La calidad del agua que estos sistemas alcanzan es aceptable, pese a las condiciones climáticas de temperatura de -8°C registradas en el penúltimo mes de monitoreo.

Los intervalos obtenidos a través del ICA indican que el afluente proveniente del arroyo Panacuale ingresó "poco contaminado" (color amarillo) y al finalizar el tiempo del monitoreo logró posicionarse el rango "aceptable" (color verde).

Las plantas ornamentales platanillo (*Canna indica*) y hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) lograron establecerse en el sistema de tratamiento; platanillo fue el más resistente a las condiciones climáticas de temperatura y calidad del agua y registró el mejor porcentaje de sobrevivencia, por lo tanto, es la especie vegetal capaz de tolerar climas semiáridos subhúmedos y ahora a climas semifríos húmedos.

La aclimatación de la vegetación no se presentó en los primeros seis meses de funcionamiento del sistema, como ocurrió en climas semiáridos subhúmedos, logró estabilizarse aproximadamente a los 12 meses de su introducción a los humedales.

Las concentraciones finales de nitratos (NO_3^-) aunque no excedieron los LMP indican que son suficientes para el crecimiento de las plantas, al visualizar el desarrollo de biomasa vegetal. Así también, el aporte de sus características fisiológicas le permitió establecerse adecuadamente en este tipo de clima.

La capacidad de depuración que alcanzan los HCFSSH en las aguas residuales a través del sustrato, las plantas y los microorganismos en diferentes regiones climáticas, los posiciona como una alternativa importante para resolver los diversos problemas de contaminación de agua que hay en nuestro país, sobre todo en comunidades medianas y pequeñas.



13. RECOMENDACIONES

Se sugiere aumentar el tiempo de retención hidráulica en el sistema y así eficientizar la remoción de materia orgánica.

El cuidado y vigilancia de las plantas ornamentales en este tipo de clima será fundamental para un adecuado funcionamiento, por lo que será necesario establecer un techado con material tipo invernadero desde el comienzo del tratamiento, y así contribuir con la capacidad depuradora de los procesos físicos, químicos y biológicos y a su vez evitar la muerte de la parte aérea de las plantas.

La introducción de las plantas al humedal para este tipo de clima será exclusivamente de *Canna indica* (platanillo), ya que es la única especie que hasta ahora se pudo aclimatar a las condiciones ambientales del sitio, la opción de introducir otra especie requerirá de tiempo para observar el comportamiento de sobrevivencia y aclimatación.



14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, S. (2005). La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. Asociación Española de Ecología Terrestre. Alicante, España. pp 17-29.
- APHA (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. Washington D.C. pp. 937.
- APHA. (2007). Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. Ed. American Waterworks Association, Washington. 125-165 pp.
- APHA; AWWA; WPCF, (1992). "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". (Métodos Normalizados para el Análisis de Agua y Aguas Residuales), 18° Edición. E.U.A. 1605p.
- Arias C., y Brix H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Noegradina Núm. 013. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia pp. 17-24
- Arias T. O. (2004). Estudio de la Biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Calderón G, Instituto de Ecología (México), Centro Regional del Bajío, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, Universidad Michoacana. (1998). Familia Cannaceae. Instituto de Ecología, México.
- Calvo, M. (1999). Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Construidos. Fundamentos Científicos, Tecnologías, Diseño. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Camargo J. A., Alonso A., (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Asociación Española de Ecología Terrestre. Edición Santos, S. A. Madrid, España.
- Campell, Neil A. y Reece, Jane B., 2007. Biología. Edit. Panamericana. 7° ed. Madrid España. pp. 812.
- Campos, J. (2011). Evaluación del contenido y transformación de las diferentes formas de fósforo y nitrógeno del agua residual tratada en un humedal de flujo subsuperficial, ubicado en Apaxtla de Castrejón, gro. México. Informe de Servicio Social. UNAM. FES Zaragoza. México.
- Cartró, J. (2003). Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana –Universidad de Catalunya, Barcelona.



- Characklis, W. G. and Christensen, B. E. (1990). "Physical and chemical properties of biofilms" in *Biofilms*, Characklis, W. G. and Marshall, K. C. eds., Wiley and Sons, New York. Pp. 93-130.
- Crites R. y Tchobanoglous G., (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, Mc Graw Hill, Santafé de Bogotá. 135p
- Da Cámara, L. et al. (2003). Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias, Ed. M. Gómez, Barcelona.
- De la Orta, A. y Muñoz, L. (2011). Evaluación de la Fenología y la Calidad del Agua Residual generada en el CBTA. No, 176 del Municipio de Apaxtla de Castrejón Guerrero tratada en un humedal construido de flujo subsuperficial. Informe de Servicio Social UNAM. FES Zaragoza. Pp. 40
- De la Vega, M. (2003). Situación de los peces dulceacuícolas en México. Revista Ciencias, 72: 20-30. UNAM Facultad de Ciencias.
- Delgadillo O., Camacho A., Pérez L., Andrade M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia. Edición Nelson Antequera Durán. pp. 7, 18.
- Espinosa, A., Beltrán M., Colinas M., Mejía J., Rodríguez M., Ubarkzyk A. (2009). Catálogo nacional de especies y variedades comerciales de plantas y flores producidas en México y Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Espinoza, N. y Raya, A. (2011). Modelo para la estimación indirecta de biomasa aérea de *Xantosomaro bustum* y *Cyperus papyrus* en los sistemas de humedales de Tetipac y Apaxtla de Castrejón, Gro. Servicio Social. UNAM FES Zaragoza. México.
- Esponda A. (2001). Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM.
- Eugenio, K y Gallardo, C. (2009). Evaluación de la calidad física, química y bacteriológica del agua tratada en un humedal de flujo subsuperficial para uso piscícola. Tesis de Licenciatura, México UNAM- FES Zaragoza.
- Faulkner, S.P. and Richardson, C.J. (1989). Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils: In constructed wetlands for wastewater treatment. Ed. Hammer D.A. Chelsea, Mi. Lewis Publishers. pp 41-72
- Gambrell, R.P and Patrick, W.H. (1978). Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments: En Plant life in anaerobic environments. Ed. D.D. Hook and R.M.M. Crawford. Ann Arbor, Miami. pp. 375-423.
- García E., (1998). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köopen. México, Offset Larios, 217
- García, J, Corzo A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo sub-



- superficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- González, M. S. (1998). Biopelículas Aerobias en Tratamientos de Aguas Residuales. Venezuela.
 - Granados, R. y Villaverde Ma. C. (1997). Microbiología Bacteriología: características y clasificación de las bacterias. Virología: características y técnicas bioquímicas. Edit. Thompson y Paraninfo. Madrid, España.
 - Hammer, D. A. and Bastian, R. K. (1989). Wetlands ecosystems: natural water purifiers. Constructed wetlands for wastewater treatment, municipal, industrial and agricultural. Capítulo 2: Hammer d. a. (ed). Lewis publisher. U.S. a. 831 pp.
 - Lara J. (1998). Depuración de Aguas residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña. pp 13- 16 y 48-58.
 - Lara, C. (2010). Transformación y valoración del paisaje en la Pecosita, Santa Rita Tlahuapan, Puebla y el Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del volcán Popocatepetl. Tesis Doctoral. Colegio de Posgraduados. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Campus Puebla. pp. 65, 68-69
 - Llagas Ch. y Guadalupe E., (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 15(17):85-96.
 - Llagas, W. A., y Gómez E. G. (2006). Diseño de Humedales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones. México.
 - Maldonado, L. (2008). El Agua en México. Fundación por la socialdemocracia de las américas A.C. Medio ambiente y desarrollo: hacia un manejo sustentable del agua. Revista 11: 47
 - Mazari-Hiriart M. (2005). "El agua como recurso". En: Mazari-Hiriart M., Jiménez C. B. y López Vidal.: El Agua y su impacto en la Salud Pública. Programa Agua, Medio Ambiente y Sociedad. El Colegio de México. UNAM. México.
 - Mejía E., García A., Palacios E., Santos A., (2002). Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. Tierra Latinoamericana, México. 20:217-225.
 - Mendoza, S. (2003). Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío, Mc. Graw Hill, Santafé de Bogotá.
 - Metcalf y Eddy, Inc. (1996). "Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización". Editorial Mc Graw Hill. Tomo 1. México D. F. 75p
 - Metcalf & Eddy. (2003). Waste Engineering: treatment and reuse. 4th ed. McGraw-Hill, Nueva York. 1819 p.
 - Miranda B., P. C. (1999). Evaluación de un Sistema de Tratamiento Biológico Incluyendo una Fase de Lecho de Raíces como Alternativa para el Tratamiento del



- Efluente del Rastro del Municipio de Pachuca, Hidalgo y su Posible Rehúso en la Comunidad. Tesis de Licenciatura. México: UNAM-FES Iztacala.
- Mistsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2000). Wetlands, ed. Jhon Wiley & sons. 3a. edición. Nueva York. pp. 920.
 - Mogollón J., Ramírez A., García B. y Bifano C., (2006). Uso de los parámetros fisicoquímicos de las aguas fluviales como indicadores de influencias naturales antrópicas. Instituto de Ciencias de la Tierra. Universidad Central de Venezuela. Apto. 3895. Caracas 1010-A. Venezuela. 23p.
 - Montaldo, A. (1991). Cultivo de raíces y tubérculos tropicales. Editorial AGRIS. 2a. ed. San José, Costa Rica. pp. 71.
 - Odum, (1972). Ecología. Nueva editorial Interamericana, 3° Ed. Impreso en México. 111p.
 - Ramalho R.S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté. España. Pp. 8, 34.
 - Ramírez, E., Robles E., Sainz M., Ayala R. Campoy, E. (2009). Calidad microbiológica del acuífero de Zacatepec, Morelos, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 25(4):255-274 Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Ramos R. et al, 2003. El agua en el medio ambiente. Muestreo y análisis Editorial plaza y Valdez. Baja california, México. Pp198
 - Rigola, M (1990). Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales. Edit. Alfaomega Barcelona, España. 37p
 - Roldán, G (2003). Bioindicacion de la calidad del agua en Colombia. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. 4p.
 - Rosales, A. y Santos, L. (2011). Caracterización física, química y biológica de aguas residuales para el diseño de humedales de flojo subsuperficial y su producción florícola, municipio de Tetipac Guerrero. Tesis. UNAM FES Zaragoza. México.
 - Scholz M, Lee B. H. (2005) Constructed wetlands: a review. Int. J. Environ Stud; 62:42-47.
 - Secretaria de comercio y fomento industrial. NMX-AA-014-1980. Cuerpos receptores y muestreo. Norma Mexicana.
 - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1996). NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes de descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. 1996. (México).
 - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación. 1997. (México)
 - Silva R. y Zamora H. (2005). Humedales artificiales. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería. Colombia, Bogotá.



- Taiz, L y Zeiger, E. (2002). Fisiología vegetal. Editado por: Colección Ciencias experimentales. 3era ed. U.S.A
- Torres, J. (2005). Eficiencia de remoción de materia orgánica de nutrimentos y bacterias en un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Tesis. UNAM. FES Iztacala. México.
- Trinidad, E. (2006). Cuantificación de bacterias nitrificantes, desnitrificantes fijadoras de nitrógeno y heterótrofas de humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de agua residual. Trabajo de pasantía como requisito de graduación, Pamplona. Universidad de Pamplona- Facultad de ciencias básicas.
- Vymazal, J. (1998). Introduction: constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Editado por: J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green, y R. Haberl. Backhuys publishers, Leiden, Países Bajos. pp 1-15
- Walbridge, M. R. (1993). Functions and values of forested wetlands in the southern united states. Journal of forestry 91: 15-19.
- Wetzel, R.G. (1999). Biodiversity and shifting energetic stability within freshwater ecosystems. Archiv fur Hydrobiologie. Spec. Issues. Advanc. Limnol. 54: 19-32.
- WRI. (2000) Pilot analysis of global ecosystems: freshwater systems. World Resources Institute. U.S.A.
- Zariñana E. (2011). Tratamiento de aguas residuales a través de un humedal construido de flujo subsuperficial para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en el campamento de pesca Arcoíris, Puebla. Tesis de Licenciatura. México: UNAM- FES Zaragoza
- Zurita F., De Anda J., Belmont M.A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Revista ScienceDirect. Ecological Engineering. 35(2009)861-869. Toronto, Canadá.

Mediografía

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2008. Programa nacional Hídrico 2007-2012. <http://www.conagua.gob.mx> (consultado el 25 de noviembre 2011)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) Atlas digital del Agua México 2011. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/> (consultado el 25 de noviembre 2011)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) Estadísticas del Agua en México. Edición 2011. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/> (consultado el 26 de noviembre 2011)



- [CONAFOR. \(2010\). Tipos de vegetación forestal y de suelos.](http://148.223.105.188:2222/2222/gif/snif_potat/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=7) Recuperado de: http://148.223.105.188:2222/2222/gif/snif_potat/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=7 (consultado el 29 de junio 2010)
- [Google Earth \(consultado el 3 de noviembre 2011\)](#)
- INAFED; 2009. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios de Puebla. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/Mpios/21180a.htm> (consultado el 8 de diciembre de 2010)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Información Nacional por entidad federativa y municipios. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> (consultado el 28 de noviembre 2011).
- InfoJardín. Recuperado de: www.infojardin.com. (consultado el 13 de diciembre 2011)
- Ramsar, (2008). Disponibilidad del agua. Recuperado de: <http://www.ramsar.org/pdf/wwd/8/cd/wwd2008a09sp%20water.df> (consultado el 9 de agosto 2011)
- Sánchez, J. M. (2004). Las especies del genero *Canna* L. (Cannaceae) cultivadas en España. Recuperado de: <http://www.arakis.es/~jmanuel/Canna.pdf> (consultado el 7 de diciembre 2011).
- Natural System International. (03/01/2011), Constructed wetlands. Recuperado de <http://www.natsys-inc.com/resouces/about-constructed-wetlands>.

15. ANEXOS



Anexo 1. Imagen real del HCFSSH en el campamento de pesca Arcoíris



Anexo 2. Imágenes del establecimiento vegetal de platanillo (*Canna indica*) y hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) en el HCFSSH



Anexo 3. Imágenes del crecimiento de platanillo (*Canna indica*), hoja elegante (*Xanthosoma sagittifolium*) y Palma areca (*Dyopsis lutescens*) en el HCFSSH.



Anexo 4. Imágenes del establecimiento vegetal en diferentes periodos del tratamiento y registro de las medidas aéreas de las especies.



Anexo 5. Imágenes de la especie mejor aclimatada al finalizar el monitoreo: *Canna indica* (platanillo)