

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

INGENIERÍA BIOQUÍMICA

PRESENTA:

YASMIN JAELI PÉREZ HERNÁNDEZ

TEMA:

**EVALUACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL Y LIBRE CON VEGETACIÓN
NATIVA DEL ESTADO DE TABASCO.**

REALIZADO EN:

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS-UJAT

PERIODO DE REALIZACIÓN: ENERO-JUNIO 2017

Dr. Gaspar López Ocaña
Asesor Externo

Ing. Rene Cuestas Díaz
Asesor interno

Contenido

1. RESUMEN.....	4
2. INTRODUCCIÓN.....	5
3. JUSTIFICACIÓN.....	6
4. OBJETIVOS	7
4.1. Objetivo general.....	7
4.2. Objetivos Específicos:.....	7
5. CARACTERIZACION DEL ÁREA QUE PARTICIPO.....	8
6. PROBLEMAS A RESOLVER	9
7. ALCANCES Y LIMITACIONES	10
7.1. Alcances.....	10
7.2. Limitaciones.....	10
8. MARCO TEÓRICO.....	11
8.1. Aguas residuales.	11
8.1.1. Clasificación de aguas residuales.	11
8.1.2. Características Físicas	12
8.2 Generalidades de los humedales.....	14
8.3 Humedales artificiales	15
8.3.1. Clasificación de los humedales artificiales	17
8.3.2 HA de flujo superficial o libre	18
8.3.3. HA de flujo subsuperficial.....	20
8.3.4 HA subsuperficial de flujo horizontal subsuperficial	21
8.4.5. HA subsuperficial de flujo vertical	22
8.4. Elementos de un HA.	23
8.4.1. Agua residual	23
8.4.2. Sustrato.....	24
8.4.3. Vegetación.....	25
8.5.4. Microorganismos	28
8.5. Mecanismos de remoción de los humedales artificiales	29
9. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	31
9.1 Revisión bibliográfica	31
9.2 Selección de la vegetación.....	31

9.3	Mantenimiento de las unidades experimentales.....	32
9.4	Recolección de la vegetación	33
9.5	Siembra y estabilización de la vegetación.....	34
9.6	Procedimientos de muestreo	35
9.7	Evaluación de parámetros fisicoquímicos.....	36
9.8	Análisis estadístico	36
9.9	Diseño experimental.....	37
10.	RESULTADOS.....	38
10.1.	Comportamiento de Temperatura y pH.....	38
10.2.	Comportamientos del pH.....	39
10.3.	Comportamiento de CE (μ s) en los HA.....	40
Figura 20.	Comportamiento de CE (μ s) en los HA.	40
10.4.	Análisis estadísticos de CE (μ s) en STARGRAPHICS 7.0 ^{MR}	40
10.5.	Comportamiento de ORP (mv) en los HA.....	41
10.6.	Comportamiento de Turbiedad.....	42
10.7.	Comportamiento de color.....	42
10.8.	Análisis estadísticos de Turbiedad y Color en STARGRAPHICS 7.0 ^{MR}	43
10.9.	Comportamiento de SDT en los HA.	44
10.10.	Análisis estadísticos de SDT en STARGRAPHICS 7.0 ^{MR}	45
10.	CONCLUSIÓN	46
11.	RECOMENDACIONES.....	47
12.	COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS	48
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1. RESUMEN

Los humedales artificiales son alternativas que se utilizan para tratar aguas residuales debido a que son de fácil manejo y de bajo costo. En el presente trabajo se evaluó la eficiencia de remoción de humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y de flujo subsuperficial (HAFS) del tren uno con vegetación de esposada de agua (*Echinodorus paniculatus*) para reducir y disminuir los contaminantes en las aguas residuales como: turbiedad, color, ORP (Potencial de Óxido Reducción), SDT (Sólidos Disueltos Totales), CE (conductividad eléctrica), temperatura y pH y visualizar su comportamiento por días de monitoreo en la fase de adaptación.

Los tiempos de retención hidráulica fueron de 5 y 7 días para los HAFL y HAFS respectivamente. Se comprobó que esta vegetación ayuda a disminuir la turbiedad, color, Potencial de Óxido Reducción, SD (Sólidos Disueltos), CE (conductividad eléctrica), temperatura y pH en tratamiento por separado en la fase de adaptación de TC (tanque de control), HAFL y HAFS debido a que las plantas absorben los contaminantes dentro de sus tejidos. En esto se empleó un análisis mediante el programa de Stargraphics 7.0^{MR} (Anova simple) para evaluar las diferencias significativas entre los tratamientos de TC, HAFL y HAFS.

El humedal que presentó la mayor disminución de contaminantes en la fase de adaptación fue el HAFL en turbiedad, color, ORP (Potencial de Óxido Reducción), SDT (Sólidos Disueltos Totales) y CE (conductividad eléctrica) con un 95% de confiabilidad. La temperatura y pH permaneció constante.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el agua ha aumentado su valor al escasearse en cantidad y calidad. El uso y consumo del agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población, y la tarea de los organismos internacionales se concentra en cuidar y mantener su calidad (Ross et al, 2006, Munguía et al., 2016). Los grandes almacenamientos de agua en el planeta son los humedales, ellos son los vastos receptores para la retención, almacenamiento y uso del agua, además son una cuna de diversidad biológica y productividad primaria necesarias para la supervivencia de innumerables especies vegetales y animales; figuran entre los ambientes más productivos del planeta (Ramsar, 2006).

A nivel mundial se ha extendido cada vez más el uso de los humedales artificiales o wetlands, los cuales funcionan a partir de los mecanismos propios que usa la naturaleza para la depuración de las aguas residuales, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos entre el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera. Existen 2 tipos de humedales artificiales, de acuerdo con el tipo de flujo: los de flujo superficial, en los que el agua fluye expuesta a la atmósfera, y los conocidos como de flujo subsuperficial, en donde el agua fluye a través de un material de soporte, generalmente grava. Estudios publicados demuestran la capacidad de los humedales de flujo horizontal subsuperficial para remover cantidades significativas de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, bacterias y metales pesados del agua residual (Rivas y Paredes, 2014).

En la UJAT-DACBIOL, se llevó a cabo este proyecto ya que esta institución genera aguas residuales con características domiciliarias en los que se evaluaron los parámetros de calidad del agua como: pH, temperatura, CE, color, turbiedad, ORP, y SDT en las entradas y salidas de los HAFL y HAFS, cabe resaltar que la especie a estudiar es endémica de la región (*Echinodorus paniculatus*), es conocida como espada de agua.

3. JUSTIFICACIÓN

En México se tiene un registro de 69 plantas de tratamiento de aguas residuales a base de HA registrados en el inventario nacional de plantas de tratamiento para aguas residuales de la Comisión Nacional del Agua (2013), esta cantidad cubre un 3.01% del total de plantas de tratamientos de aguas residuales de nuestro país, tiene una capacidad instalada de 674.5 l/s y tratan un 0.53% del total de las aguas residuales que se generan en México.

De acuerdo a las aportaciones de Sanabria en el 2010, los humedales artificiales son excelentes sistemas de tratamiento de aguas residuales, son económicamente viables, de gran capacidad para la remoción de contaminantes, reconocidos como sistemas adecuados para la depuración de DBO₅, SS y Nitrógeno, para los cuales se obtienen rendimientos superiores al 80%, siendo también eficientes en la remoción de metales, trazas orgánicas y patógenos. Por otro lado, Hafeznezami et al., (2012) afirmaron que en las últimas décadas, ha habido un creciente interés en el uso de humedales artificiales (HA) para el tratamiento de aguas contaminadas debido a sus bajos efectos de invernadero, bajo mantenimiento y costos de operación, y la eficiencia energética.

En este sentido la contribución de este proyecto de investigación es conocer la influencia de los parámetros de operación en la fase de estabilización utilizando la vegetación de *Echinodorus paniculatus* comúnmente conocidas como espada de agua, fueron recolectadas en la colonia Gaviotas Sur, sector Armería y además es distribuida en América: desde México hasta Argentina (Lehtonen y Mylly, 2008). Por otro lado, uno de los problemas principales en los sistemas es que se han evaluado especies introducidas y no se han evaluado el potencial de adaptación y crecimiento de las variedades desarrolladas en la región para la fitorremediación de contaminantes básicos.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Estudiar la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en humedales artificiales de flujo libre, flujo sub-superficial con vegetación nativa de humedales de Tabasco.

4.2. Objetivos Específicos:

- Evaluar la fase es estabilización de los humedales artificiales.
- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de control de procesos (pH, temperatura, Conductividad eléctrica, turbiedad, Color y SDT) en influente y efluente de las unidades de proceso.
- Determinar la eficiencia de remoción de la vegetación *Echinodorus paniculatus* en la fase de estabilización de los HA de flujo libre y subsuperficial.
- Realizar un análisis comparativo del tipo de reactor y vegetación.

5. CARACTERIZACION DEL ÁREA QUE PARTICIPO

La Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, división de ciencias biológicas (DACBIOL) está ubicada en el Km. 05 de la carretera Villahermosa- Cárdenas entronque con Bosques de Saloya. La institución ocupa una superficie total de 21 hectáreas (figura 1), donde cuenta con las carreras de licenciaturas en Biología, en Ingeniería Ambiental, en gestión ambiental y en agua a distancia, así como también cuenta con tres posgrados, de los cuales son dos Maestrías en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental y Maestría en Ciencias Ambientales y un Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales.



Figura 1. División Académica de Ciencias Biológica (Fuente: Google Earth)

Para la realización de este proyecto se estuvo trabajando en dos distintas áreas localizadas dentro de la institución como se muestra en la figura 1, como primera instancia se encuentra el área de los humedales artificiales donde se llevó acabo la parte de siembra y estabilización de la vegetación y posteriormente el mantenimiento de los mismos y también la toma de muestras para ser analizadas en el laboratorio de tecnología del agua, siendo esta última área donde se realizaron los análisis pertinentes para verificar que el agua residual tratada cumpliera con lo establecido en el proyecto.

6. PROBLEMAS A RESOLVER

Por los impactos que se pueden generar en nuestro medio, debido a la generación de aguas residuales (AR), es necesario analizar técnicas de tratamiento de aguas residuales que sean aplicables, económicos, técnicos y que contribuyan con el cuidado del medio ambiente. Una de estas técnicas es la de humedales artificiales (HA) ya que requieren de poco personal operativo y el proceso de tratamiento en el AR involucra elementos que son provistos por la naturaleza (CONAGUA, 2013). Por ello, es necesario tratar las AR con el fin de prevenir la contaminación de agua superficial receptora o inclusive agua subterránea (Mihelcic & Zimmerman, 2012).

Por lo tanto, en este trabajo se evaluará el potencial que tiene la vegetación *Echinodorus paniculatus* en la fase de estabilización para remover contaminantes básicos de origen domestico realizadas en la DACBIOL-UJAT, utilizando el sistema de HA establecidas por López et al (2013), por otro lado, se analizará la adaptación de *Echinodorus paniculatus*, ya que es una nueva especie de plantas que pueden ser aprovechados en los HA y así evitar la introducción de especies que no son nativas del estado y con ello minimizar los costos de operación y mantenimiento al utilizar especies nativas en las futuras plantas de tratamiento de AR en HA que sean se han de fácil adaptación.

7. ALCANCES Y LIMITACIONES

7.1. Alcances

- Demostrar que los humedales artificiales son excelentes sistemas de depuración y que cumplen con las mismas funciones que los sistemas convencionales pero con un menor costo de operación y mantenimiento haciéndolos más factibles a la hora de elegir un tipo de tratamiento para aguas residuales.
- Hacer usos de los recursos naturales que tenemos a nuestros alcances para evitar la introducción de nuevas especies.
- Proponer que los humedales artificiales son viables en comunidades de mediana y pequeña población ya que la mayoría de estas no cuentan con sistemas de depuración debido a su alto costo de operación y mantenimiento y así ayudar al ambiente con los humedales como medida de mitigación en cuanto al impacto ambiental que generan las aguas residuales cuando estas no son tratadas.

7.2. Limitaciones

- El rendimiento del sistema puede ser estacional en respuesta a los cambios en condiciones ambientales, incluyendo lluvias y sequías
- Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan y evitar dejarlos completamente secos.
- En algunos casos es necesario emplear grandes extensiones de tierra para el tratamiento.

8. MARCO TEÓRICO

8.1. Aguas residuales.

Existen diversas infinidades de definiciones para las aguas residuales una de ellas dice que; -Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado- (OEFA, 2014).

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual (Romero, 2002).

8.1.1. Clasificación de aguas residuales.

De acuerdo a su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

- a) **Aguas Residuales Domesticas:** Son aquellos residuos humanos utilizadas con fines higiénicos (baños, cocina, etc.), y también residuos originados por establecimientos comerciales, públicos y otros.
 - **Aguas Negras.-** Conformadas por las aguas escatológicas, presentando una alta concentración de materia orgánica y microorganismos.
 - **Aguas Blancas.-** Son las que han sido empleadas para limpieza.

- b) **Aguas Residuales de Industria:** Son líquidos generados en los procesos industriales, dependiendo del tipo de industria.
 - **Aguas Orgánicas.-** Constituidas por los resultantes de industrias de leche, alimentos, textiles, destilerías, etc. Que presentan una alta concentración de materia orgánica y pueden ocasionar severa contaminación.

- **Aguas Tóxicas.**- Son el resultado de procesos industriales de productos químicos, metálicos, etc., que pueden ocasionar incluso daños de corrosión y alterar los tratamientos.
 - **Aguas Inertes.**- Son residuos de industrias de cerámica, mármoles, aparatos de refrigeradoras, que producen obstrucciones por sedimentación y contaminación física.
- c) **Agua de Infiltración:** Las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza.
- d) **Aguas Pluviales:** Son aguas de lluvia que descargan grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de esta agua es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas, etc., que pueden estar sobre el suelo (Sainz, 2005).

8.1.2. Características Físicas

.Tabla 1.-Descripción de las características físicas del agua residual (Gallegos, R., 2017).

Característica	Descripción
Color	La coloración de las aguas residuales urbanas determina el tiempo que tiene de haber sido generada. Ordinariamente varía del beige claro al negro. Si el agua es reciente, tendrá una coloración beige clara; oscureciéndose a medida que pasa el tiempo, pasando a ser de color gris o negro, debido a la implantación de condiciones de anaerobiosis, por descomposición bacteriana de la materia orgánica(Martín et al., 2006). Si él se deja pasar mucho tiempo el agua residual genera un color más intenso o oscuro la capacidad de absorción de luz solar será mayor (Seoáñez., 1999)
Turbidez	La presencia de materias en suspensión, arcilla, limos, coloides orgánicos, plancton y organismos microscópicos da lugar a la turbidez en un agua. Estas partículas (de dimensiones variables desde 10 nm hasta 0,1 mm) se pueden asociarse a tres categorías: minerales, partículas orgánicas húmicas y partículas filamentosas. Es un indicador esencial para conocer el estado en que se encuentra el agua y como debe ser tratada es te parámetro es muy útil en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. (NMX-AA-038-SCFI-2000).
Temperatura.	Es la cantidad de calor que presenta el agua residual doméstica. Esta propiedad termodinámica influye de manera puntual en las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua naturales. Ha afectado la fauna, la flora acuática, la velocidad de reacción bioquímica y la transferencia de gases. Si la temperatura aumenta la velocidad de biodegradación de los compuestos orgánicos también aumenta. La temperatura del agua residual por lo general es mayor en comparación con el agua de suministro municipal, esto es a consecuencia del agua caliente

Característica	Descripción
	ocupada en las viviendas. Dependiendo de la ubicación geográfica al temperatura del agua varía entre 10 y 21.1°C (Martín et al., 2006)
Sólidos	De forma general los sólidos son todos aquellos elementos o compuestos presentes en el agua residual urbana que no son agua. Entre los efectos negativos sobre los medios hídricos, caben destacar entre otros, disminución en la fotosíntesis por el aumento de la turbidez del agua, deposiciones sobre los vegetales y branquias de los peces, pudiendo provocar asfixia por colmatación de las mismas; formación de depósitos por sedimentación en el fondo de los medios receptores, favoreciendo la aparición de condiciones anaerobias o aumentos de la salinidad e incrementos de la presión osmótica (Martín et al., 2006)
Conductividad.	Nos permite tener una idea del grado de mineralización del agua residual. Es necesario regular el valor de conductividad especialmente cuando el agua tratada por las plantas de tratamiento será reutilizada en actividades agrícolas o será derramada a cuerpos de agua naturales. (NMXAA-093-SCFI-2000).
Características químicas	
pH.	Es un factor importante en los métodos de tratamientos, ya que se pretende que la alcalinidad natural del agua residual, actúe para conservar un pH neutro necesario para la actividad biológica. Si el pH se sale de los rangos de 6.5 y 8.5 no se podrá realizar un tratamiento biológico y se generaran problemas de corrosión (Noyola et al., 2000).
Alcalinidad y Acides.	La alcalinidad es la capacidad que tiene el agua para neutralizar los ácidos, mientras que la acides es la capacidad que tiene el agua para neutralizar los compuestos básicos (Noyola et al., 2000).
Demanda de oxígeno	Los compuestos orgánicos por lo regular son inestables y puede oxidarse biológica y químicamente para obtener productos finales estables. La cantidad del contenido orgánico de un desecho está relacionado con la cantidad de oxígeno que requiere para estabilizarse
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	Mide la cantidad de oxígeno que requiere los microorganismos para procesar la materia orgánica en CO ₂ y para el nuevo material celular. Al igual que aporta el oxígeno requerido para realizar la nitrificación. (Noyola et al., 2000).
Demanda química de oxígeno (DQO)	Algunas sustancias presentes en el agua residual al ser derramadas a un flujo de agua, captan parte del oxígeno existente debido a la presencia de sustancias química reductoras (Seoáñez., 1999), es por ello que el valor de DQO nos permite tener una perspectiva de la cantidad de materia oxidable (organica e inorgánica). Los resultados normalmente obtenidos son DBO<DQO.
Nitrógeno.	Es un elemento importante en el tratamiento de aguas residuales biológicas, ya que si se tiene usencia o escasas de este elemento no se podría efectuarse las reacciones biológicas (Noyola et al., 2000).Este elemento lo podemos encontrar en las aguas residuales, formando parte de compuestos como proteínas, poliptidos y aminoácidos (Seoáñez., 1999).
Fósforo.	Su presencia es pieza clave en los tratamientos biológicos. Es necesario para la reproducción y síntesis de nuevos tejidos celulares. Las aguas residuales doméstica son ricas en fosfatos porque contiene altos contenidos de desechos humanos y detergentes sintéticos, las aguas esta tan cargada de este elemento que los tratamientos biológicos son una de las mejores alternativas (Noyola et al., 2000)
Grasas y aceites	Son uno de los principales problemas con los que se enfrenta los tratamientos biológicos, ya que se encuentran en la superficie del agua limitando la transferencia de los gases entre el aire y el agua, principalmente el oxígeno. Su descomposición puede ser lenta o nula.

8.2 Generalidades de los humedales

Un humedal natural es una extensión de terreno normalmente plana, cuya superficie está inundada de forma permanente (por la influencia de aguas superficiales o subterráneas) o posee periodos de inundación intermitente. Nos encontramos ante ecosistemas con carácter híbrido entre los puramente acuáticos y los terrestres. Existen gran variedad de humedales atendiendo a sus propiedades geológicas como son ciénagas, esteros, marismas, pantanos, turberas o manglares, figura 2 (Andreo, 2014).



Figura 2. Humedal natural.

La EPA (US Environmental Protection Agency) los define, atendiendo a regulaciones federales, como: “a aquellas áreas que están inundadas o saturadas por aguas superficial o subsuperficial con una frecuencia y duración suficiente para su mantenimiento y que bajo circunstancias normales de soporte prevalecen especies típicas de vegetación adaptadas a la vida en suelos inundados o saturados. Los humedales incluyen generalmente pantanos, ciénagas, pantanos y áreas similares” (EPA, 2000).

Según la EPA (1998), los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren un potencial atractivo para el tratamiento de aguas residuales: (1) Fijan físicamente los contaminantes a la superficie del suelo y la materia orgánica, (2) Utilizan y

transforman los elementos por medio de los microorganismos y (3) Logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento. En el caso particular este tipo de procesos no requiere de instalaciones costosas, además de que son muy sencillos de operar y no requieren de energía eléctrica para funcionar, en ese sentido los costos de tratamiento vienen siendo hasta 300% más bajos que los tratamientos convencionales. Es por ello que el uso de los HA para el tratamiento de aguas residuales es cada vez más aceptado en diferentes partes del mundo.

8.3 Humedales artificiales

Los humedales artificiales, al igual que los naturales, pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua tales como: sólidos en suspensión, DBO, nutrientes, metales, patógenos y otros productos químicos. Ya que la depuración del agua ocurre por la interacción entre elementos componentes del humedal y de los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal (figura 3), con la intervención del sol como fuente principal de energía, para la eliminación de grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fosforo e incluso productos tóxicos (Arias I. y Hans Brix, 2003).

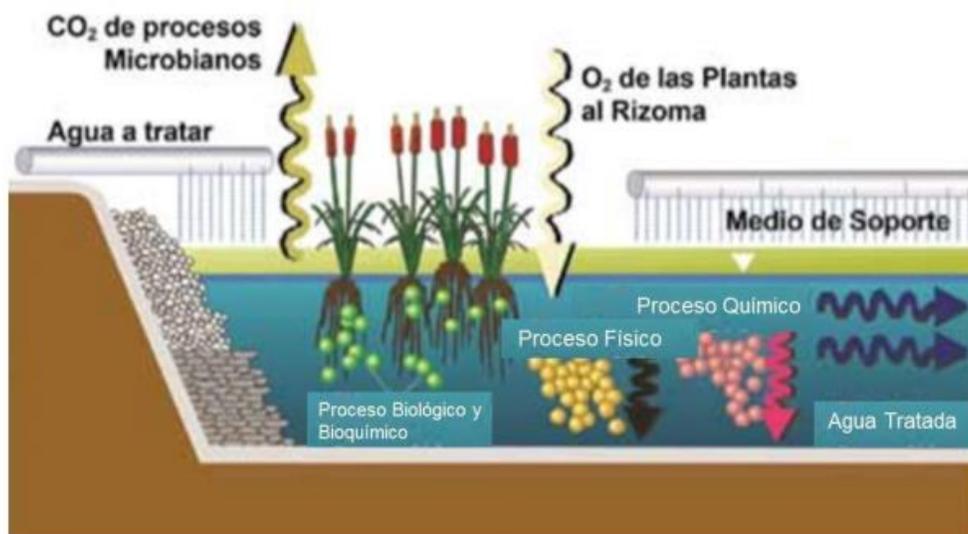


Figura 3. Principales procesos depurativos en los HA (Luna, 2015)

Esta eliminación se da por una variedad de procesos (Tabla 1) que incluyen la sedimentación, filtración, metabolismo microbiano (aeróbico y anaeróbico), absorción de la planta y respiración. La principal diferencia entre un humedal natural y un humedal artificial es que el humedal artificial permite el tratamiento de aguas residuales bajo diseños que se basan en objetivos específicos de calidad del efluente (Seoáñez, 2005).

Tabla 2. Procesos naturales en un humedal artificial (Seoáñez, 2005).

Fase	Proceso
Acción bacteriana	Conversión y transformación de contaminantes. En la transformación aerobia de los residuos orgánicos se consume oxígeno. Se realizan también transformaciones de productos orgánicos tóxicos. Siempre se reduce la DBO.
Absorción de oxígeno	Si la lámina líquida del humedal no está en saturación de oxígeno disuelto, lo toma de la atmósfera, en una aireación natural.
Desorción de oxígeno	Es la situación contraria a la absorción de oxígeno.
Sedimentación	Se debe al movimiento lento del líquido, que hace que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo. En ciertos casos se produce una floculación. En otros se producen turbulencias (en la entrada) que hace que los sólidos se disminuyan uniformemente por todo el humedal.
Degradación natural	La superficie de muchos organismos tiene un plazo limitado por lo que gran parte de ellos muere pasado un tiempo. Por otra parte, la acción fotoquímica provoca la oxidación de muchos componentes orgánicos.
Adsorción	Muchos contaminantes químicos tienden a unirse por adsorción con diversos sólidos, lo que dependerá en gran parte de la cantidad y composición de estos presentes en la fase líquida en forma de suspensión. Esta adsorción se complementa casi siempre con la posterior sedimentación.
Volatilización	Los contaminantes volátiles presentes en el líquido se transfieren a la atmósfera.
Reacción química	A parte de las reacciones fotoquímicas en la degradación natural, en el humedal existen fenómenos de hidrólisis, oxidaciones diversas, reacciones, etc.

Evaporación	Aparte de la volatilización y de la Desorción, muchos gases que se pueden aportar con el afluente se pueden evaporar y lo mismo ocurre con parte de la masa del humedal, que pueden ver reducido así su volumen.
-------------	--

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: (1) La actividad bioquímica de los microorganismos, (2) El aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día y (3) El apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de las plantas, además de funcionar como material filtrante (Delgadillo, et al, 2010).

8.3.1. Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que empleen en su funcionamiento: macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres.

Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados en:

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: Estos humedales cuentan con plantas que flotan libremente por la superficie de sus aguas. Son plantas capaces de eliminar nitrógeno mediante desnitrificación y fósforo incorporándolo a su biomasa, pudiendo eliminar también sólidos en suspensión del agua (Saeed y Sun, 2012). El jacinto de agua llamado también camalote o tarope (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*, *Spirodela polyrhiza*) son algunos ejemplos.

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos. Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: 1) humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas y 2) humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal. Los humedales artificiales, al igual que los naturales, pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua tales como: sólidos en suspensión, DBO, nutrientes, metales, patógenos y otros productos químicos (Osnaya, 2012).

Existen dos tipos de humedales artificiales que se diferencian según su sistema de circulación de las aguas aplicadas. Humedal superficial de flujo libre (FWS) por sus siglas en inglés y Humedal de flujo subsuperficial (SSF) (Seoáñez, 2005).

En la figura 4 sintetizamos los distintos tipos de humedales artificiales:

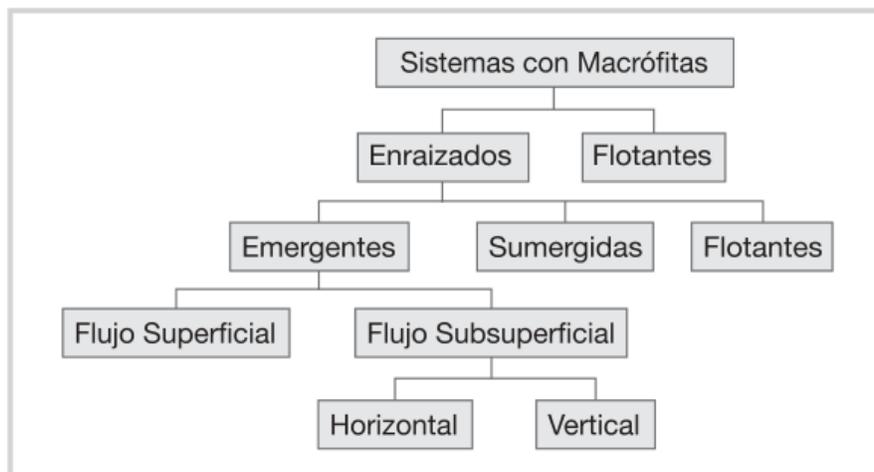


Figura 4. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas (Delgadillo et al., 2010).

8.3.2 HA de flujo superficial o libre

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas (figura 5).

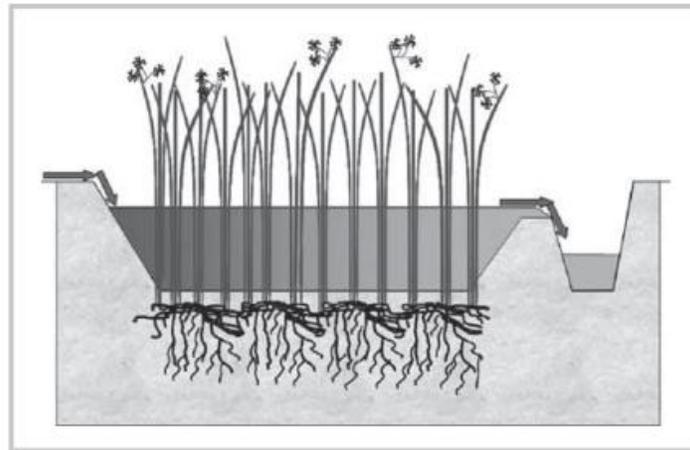


Figura 5. HA de flujo superficial y/o libre (Delgadillo et al., 2010).

Los HAFS suelen instalarse para tratar efluentes procedentes de tratamientos secundarios. La alimentación a estos humedales se efectúa de forma continua y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y las raíces de la vegetación emergente implantada. Tallos, raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas.

En la siguiente tabla se presenta algunas de las ventajas y desventajas de los sistemas de humedales superficiales de flujo libre.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de un sistema de humedales FL (EPA, 2000).

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.	Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos. La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
Proporcionan una adicción valiosa al “espacio verde” a una comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo libre es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.

8.3.3. HA de flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial, se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular, con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos de acuerdo a la aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical.

Al igual que para el humedal de flujo libre, se presenta para este sistema algunas ventajas y desventajas que deben ser tomadas en cuenta, tabla 3.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal FS (EPA, 2000).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Proporcionan tratamiento efectivo en forma positiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.	Un humedal FS requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
La configuración de los HAFS proporciona una mayor protección térmica que los HAFL.	La mayoría del agua contenida en los humedales FS es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos no lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH ₃ y NO ₃ .
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.	Los humedales FS no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.

8.3.4 HA subsuperficial de flujo horizontal subsuperficial

El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas. Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo.

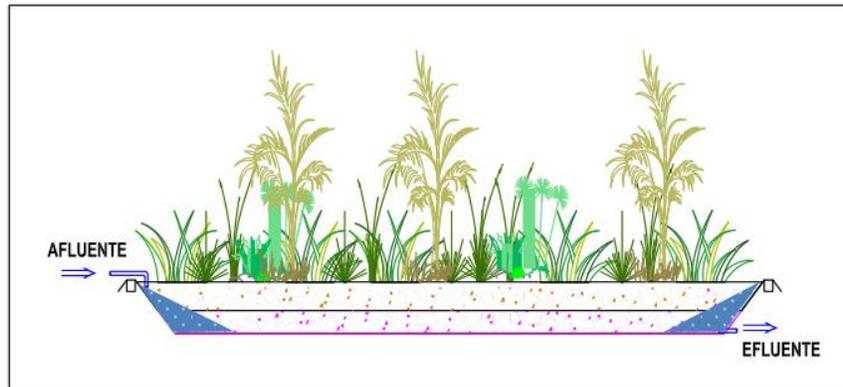


Figura 6. HA de flujo subsuperficial horizontal (Andreo, 2014).

El agua ingresa de forma permanente, aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El sistema de entrada y salida del agua consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm.

El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso. La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1%.

8.4.5. HA subsuperficial de flujo vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios.

También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua, figura 7.

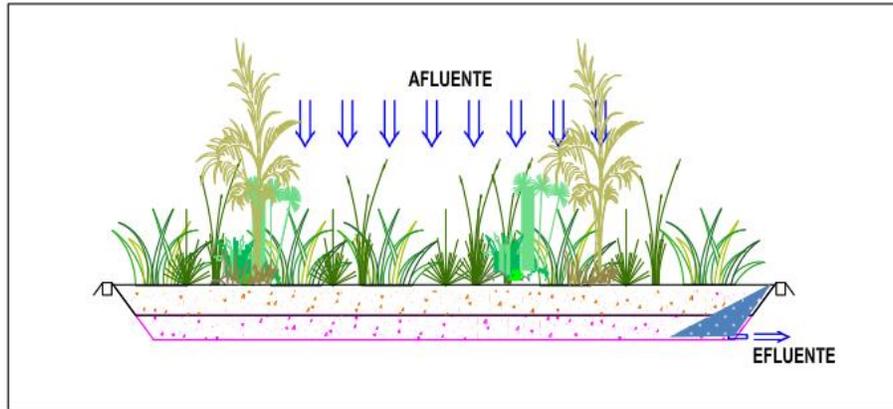


Figura 7. HA subsuperficial de flujo vertical (Andreo, 2014).

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular.

Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo.

8.4. Elementos de un HA.

Los humedales artificiales están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos (Villarroel, 2005).

8.4.1. Agua residual

Son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las

conducirá hacia el humedal, en este caso (Delgadillo et al., 2010). Según su uso precedente, estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación (Mendonca, 2000).

8.4.2. Sustrato

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico.

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica 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).

El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas.

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica.

De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas).

8.4.3. Vegetación

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen 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 nitrificación (Arias, 2004).

De acuerdo a Lara (1999), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escurrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.

- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

De manera muy sistemática las plantas pueden incorporar las sustancias contaminantes mediante distintos procesos; figura 8:

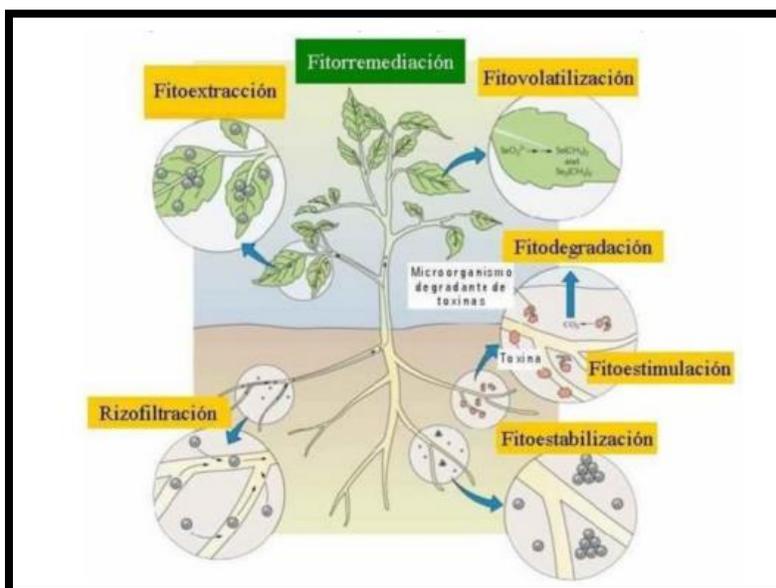


Figura 8. Procesos que se llevan a cabo mediante la vegetación (ArgenBio, 2007).

Tabla 5. Proceso fisiológico de las plantas (Arias, 2010).

Tipo	Procesos involucrados	Contaminación tratada
Fitoextracción	Las plantas concentra los contaminantes en las partes cosechables	Diversas aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio y zinc.
Rizofiltración	Las raíz de la plantas se usan para adsorber, precipitar y concentrar los contaminantes a partir de efluentes contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo selenio, zinc, isotopos radioactivos y compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes se usan para reducir su movilidad y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros, aguas residuales. Propuestos para fenólicos y compuestos clorados.

Tipo	Procesos involucrados	Contaminación tratada
Fitoestimulación	Se usa los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc, aguas residuales agropecuarias.
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican los contaminantes o compuestos orgánicos y los libera a la atmosfera con la transpiración.	Aguas residuales agropecuarias y aguas con mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degrada compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos	Aguas residuales agropecuarias, municiones(TNT,DNT,RDX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitritos, etc.

8.4.3.1 Echinodorus paniculatus

Echinodorus paniculatus Micheli in A. & C. DC., Monogr. Phan. 3: 51. 1881.

(Figura 9).

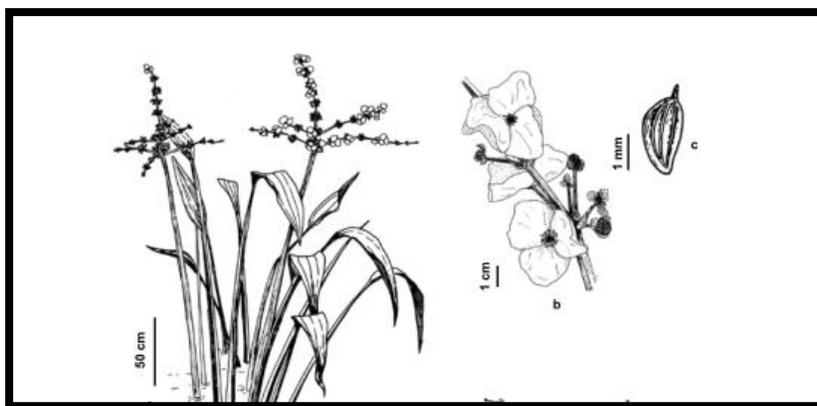


Figura 9. *Echinodorus paniculatus* a. Planta con inflorescencias. b. Flores. c. Fruto. (Lehtonen y Mylly, 2014).

Hidrófitas arraigadas, emergidas. Rizomas cortos y gruesos. Hojas emergidas o sumergidas; pecíolos triangulares, 16-80 cm de largo; láminas 8-30 cm de largo, 1-12 cm de ancho, lanceoladas, sin marcas pelúcidas; base atenuada a obtusa; ápice agudo. Inflorescencia simple o ramificada, glabra, escapos hasta 200 cm de largo, con 4-11 verticilos, cada uno con 5-21 flores, triangulares hacia la base, triangulares

entre los verticilos, erecto a decumbente, con formación de yemas vegetativas; brácteas 1-5,5 cm de largo; pedicelos 1-4 cm de largo, erectos.

Flores 3-4,5 cm de diámetro; sépalos 6 mm de largo; pétalos 23 mm de largo, blancos. Estambres 19-22; anteras versátiles; carpelos numerosos. Frutos 1,5-3 mm de largo, 1 mm de ancho, con 4-6 costillas, sin glándulas, pico estilar 0,1-0,8 mm de largo.

Ecología: crece en pantanos herbáceos, canales de irrigación, orillas de lagos, lagunas y ríos entre 0-1400 m snm. Florece y fructifica entre julio y agosto distribución en América: desde México hasta Argentina (Lehtonen y Myllys 2008).

Usos: como planta ornamental en acuarios (Kasselmann 2001). En algunas regiones de Sudamérica es utilizada como planta medicinal (Pott, 2000).

Es una especie muy común, encontrándose también en localidades perturbadas por actividades antrópicas.

8.5.4. Microorganismos

Los microorganismos presentes en el material de soporte son los responsables de llevar a cabo la degradación biológica de la materia orgánica. Estos consumen el C, N y P disueltos en el agua y parte de estos nutrientes se integran al tejido celular produciendo nuevos organismos y la otra parte se “mineraliza” o transforma (se transforma en CO₂, nitritos, nitratos e incluso nitrógeno molecular). Los microorganismos presentes en un HA incluyen a bacterias, hongos, protozoos, etc. (Guido-Zarate, 2006). En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. (Arias, 2004). Figura 9.

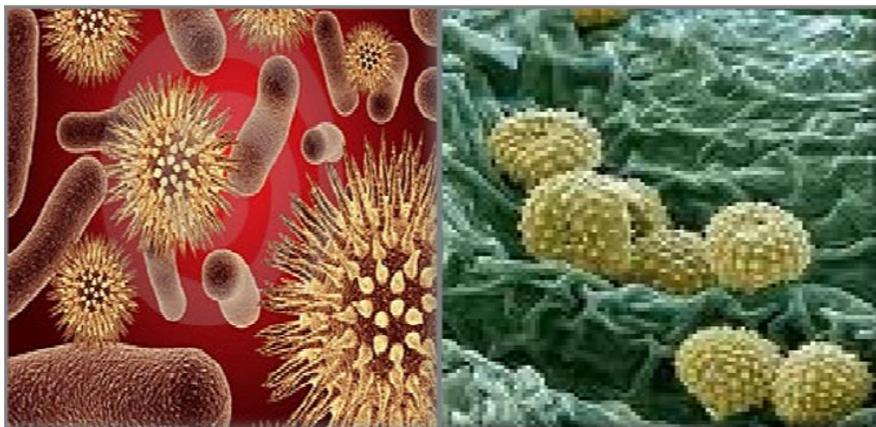


Figura 9. Microorganismos presentes en humedales HA para la degradación de materia orgánica (Sanabria, 2010).

8.5. Mecanismos de remoCión de los humedales artificiales

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La eliminación de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son tamizados, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbológica de la DBO y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. En la Tabla 3 se pueden ver los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual (Mena et al., 2008).

Tabla 5. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales (Mena et al 2008).

Contaminantes	Mecanismos de eliminación
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación • Filtración
Materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación microbiana aerobia • Degradación microbiana anaerobia
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación • Asimilación por parte de las plantas adsorción principal • Volatilización del amoniaco
Fosforo	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorción por parte del lecho

	<ul style="list-style-type: none">• Asimilación por parte de las plantas
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none">• Asimilación por parte de las plantas• Intercambio iónico
Patógenos	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentación• Filtración• Muerte natural• Radiación ultravioleta

9. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

En este proyecto de investigación se incluyen actividades de campo, laboratorio y gabinete, lo cual servirá de guía para las diferentes etapas. En la figura 10 se puede observar de manera general las actividades a desarrollar.

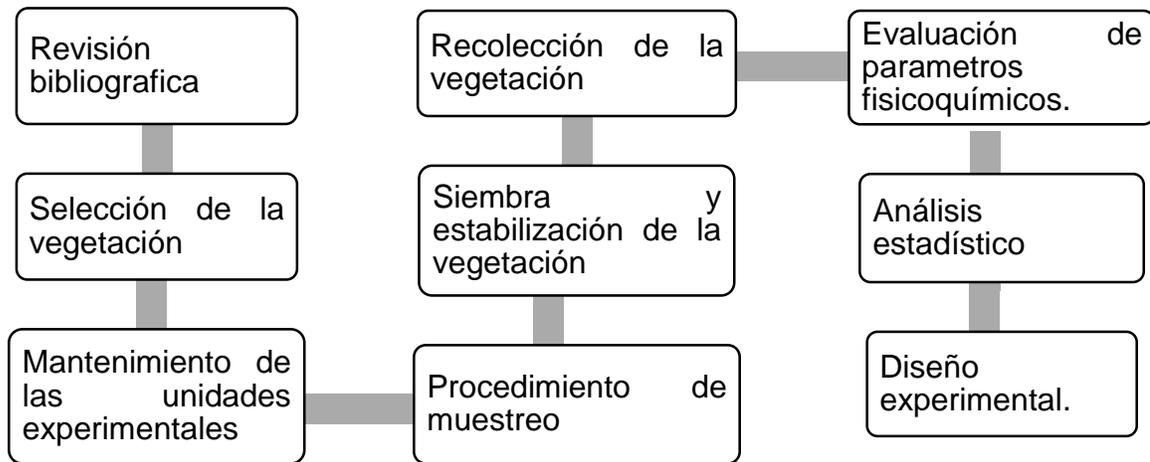


Figura 10. Actividades generales

Descripción de Actividades Generales Realizadas

9.1 Revisión bibliográfica

Revisión bibliográfica nacional e internacional sobre el diseño de humedales artificiales de flujo libre, de flujo subsuperficial y sistema de plantas acuáticas.

9.2 Selección de la vegetación

En la literatura de Crites y Tchobanoglous, (2000); Manuales de la USEPA, (2000), describen que para los sistemas de flujo libre la vegetación común incluye Eneas (*Typha latifolia*), carrizos (*Phragmites australis*), juncias (*Carex spp.*) y juncos o

tatora (*Scirpus spp.*); y en los sistemas de flujo sub-superficial la vegetación común incluyen Jacinto (*Eichornia crassipes*) de agua o lentejas de agua.

Por lo anterior, en este proyecto se evaluará la planta *Echinodorus paniculatus* como objeto de estudio, reportados 9 especies en México y tres en el estado de Tabasco del cual no se tienen reportes para la remoción de contaminantes en los humedales artificiales. Figura 11.



Figura 11. A) Planta de *Echinodorus paniculatus*, B) flor y C) raíz.

9.3 Mantenimiento de las unidades experimentales.

Para la realización de este proyecto se utilizó el diseño de López et al, 2013. Para dar mantenimiento a los reactores se colocó sobre todo el interior una fibra textil tipo malla impermeable de espesor 0.1 mm, la cual fue adherida con impermeabilizante hacia la paredes, figura 12. Posteriormente se les colocó grava mixta de río en el interior de cada uno, en el HAFS hasta una altura de 0.5 m de alto. A los HAFL se les aplico el mismo principio, solo con la diferencia de que la grava en el interior de cada HA solo se llenó hasta una altura de 0.1 m de alto. El agua residual fluye a través de cada HA de manera horizontal. Las interconexiones para la distribución de agua se llevaron a cabo mediante tuberías de PVC hidráulico de una pulgada de diámetro, al igual que las válvulas de control de entrada y salida de agua. La capacidad de tratamiento de cada HA es de 200 L/día.

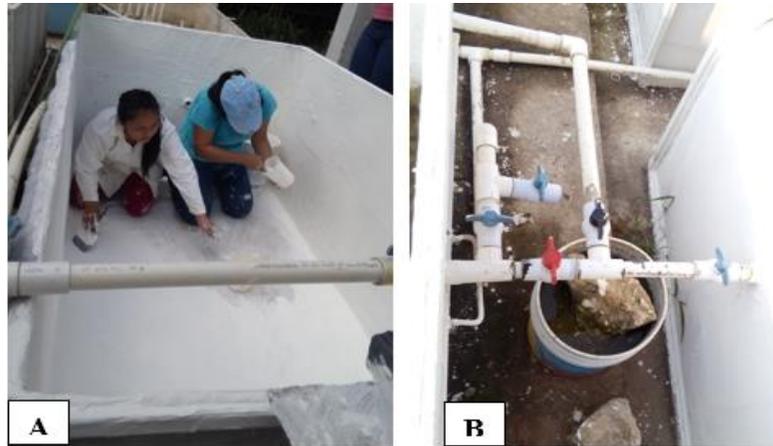


Figura 12. A) Impermeabilización de los reactores, b) conexión de las tuberías.

9.4 Recolección de la vegetación

La vegetación fue colectada de humedales naturales provenientes de la colonia Gaviotas Sur, sector Armenia, carretera Torno largo sobre el km 2.5. Se recolectó *Echinodorus paniculatus* aproximadamente 40 ejemplares y fueron sembradas en los HAFL y en los HAFS. Figura 13.



Figura 13. Recolección de la vegetación *E. paniculatus*.

Se utilizó un blanco en el HL (Humedal Libre) en el que solo se colocó grava a 0.1 m y un blanco de HS (Humedal subsuperficial) a 0.5 m. Como producto final se evaluaron dos unidades experimentales de HA y dos controles (Figura 14), las

cuales fueron alimentadas por dos tanques de recepción de agua cruda con capacidad de 1m³ de agua.

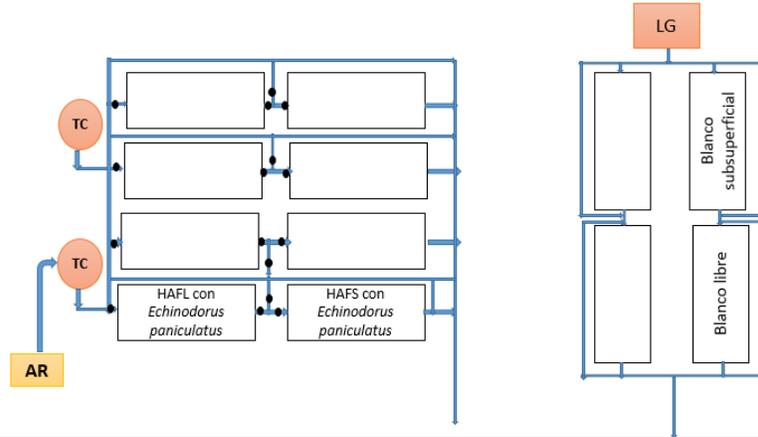


Figura 14. Diagrama de la configuración de los HA y sus controles. Los puntos negros son válvulas de control de entrada y salida en cada unidad experimental.

9.5 Siembra y estabilización de la vegetación

Para el sembrado de la vegetación se hicieron los respectivos orificios sobre el material de soporte con una profundidad aproximada de 5 a 10 cm para los HAFL y de 5 cm para los HAFS. En ambos casos la vegetación se sembró con una distancia de 15 cm aproximadamente de manera triangular o tresbolillo, denominada de esa forma porque los agricultores para su trazado utilizan tres varas (bolillos) de igual longitud; la cual consiste en colocar cada planta en el vértice de triángulos equiláteros, cuyo lado tiene una longitud igual a la de la distancia de siembra; es decir, de tal manera que el agua pudiera interactuar con la vegetación (Méndez, 2014).. Esto tal y como se muestra en la siguiente figura 15:

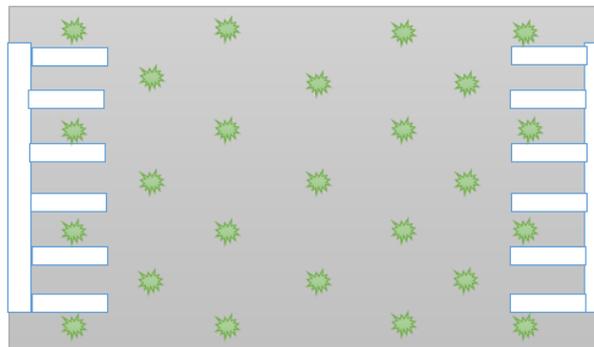


Figura 15. Acomodo de la vegetación.

En ese sentido esta técnica de sembrado tiene ventajas ya que al momento de realizar la siembra a iguales distancias caben más plantas por unidad de superficie, en la cual tendrá mayor eficiencia del terreno o área a trabajar, por parte de las raíces de las plantas.

En la etapa de estabilización, se alimentará intermitentemente primero con agua limpia al inicio y posteriormente con agua residual proveniente de los baños de de la DACBioI-UJAT, manteniendo un nivel adecuado para que la vegetación se establezca bien. Se puso en operación a los HA durante un periodo de dos meses para que las plantas se adaptaran a las nuevas condiciones a las que fueron sometidas. Figura 16.

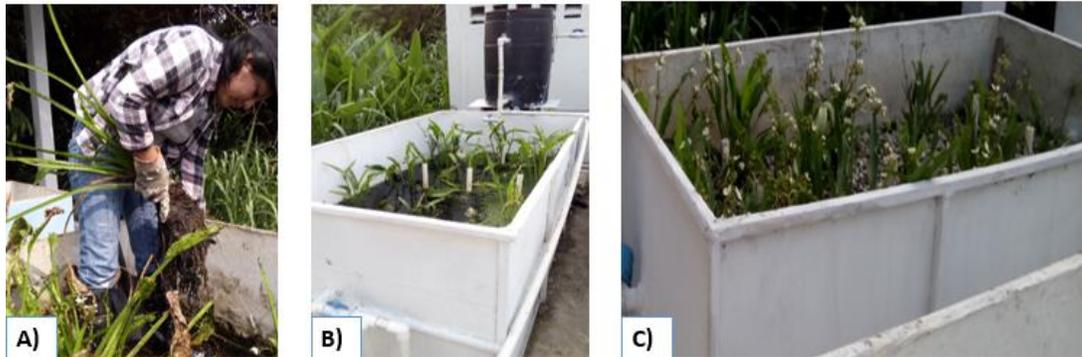


Figura 16. A) Siembra de la vegetación, B) HAFL (estabilización) y C) HAFS (estabilización).

9.6 Procedimientos de muestreo

Se llevaron a cabo los muestreos en las aguas residuales a partir de que la vegetación fue sembrada en los reactores, con el fin ver la estabilización de la vegetación. Para obtener resultados completos del desempeño de los humedales se hicieron llevaron a cabo muestreos simples. Con las muestras simples se determinaban parámetros fisicoquímicos como pH, Temperatura, OD, POR, SDT, Color y Turbiedad y se realizaban en el Laboratorio de Tecnología del Agua.

Las muestras simples se realizaron de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, en frascos de 500 ml de capacidad, en los primeros muestreos de la fase de adaptación solo se analizaron una vez por día durante tres meses (abril, mayo y junio) y los muestreos reales se tomaron después de que la vegetación se encontró

estable, se tomaron durante cuatro semanas (en el mes de julio), para obtener resultado precisos y confiables de la remoción de contaminantes en lo HA. El horario en que las muestras fueron tomadas en tres horas distintas; 8 am, 11 am y 2 pm siguiendo intervalos de 3 o 4 hrs señalados en la NMX-AA-003-1980-CONAGUA, de aguas residuales y muestreo (figura 17).



Figura 17. Análisis de muestras de aguas residuales.

9.7 Evaluación de parámetros fisicoquímicos

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos como: pH (NMX-AA-008), temperatura (NMX-AA-007), CE, ORP, color, turbiedad, y SDT, todos estos parámetros se midieron en la entrada y salida en cada uno de los HA y los controles durante un periodo de tres meses. La turbiedad se midió con un turbidímetro marca LaMotte^{MR} con precisión 0.01 NTU-turbiedad (método EPA 180.1, TC-300e, ISO7027, TC-300j). El color fue medido con el mismo equipo con una precisión de 0.1 C.U-color aparente (método estándar 2120B). El periodo de muestreo (parámetros fisicoquímicos) se llevó a cabo durante el mes de junio del 2017.

9.8 Análisis estadístico

Se compraron las variables de respuestas cuantitativas de turbiedad, color, CE, ORP y SDT de los diferentes tipos de tratamientos de HAFL y HAFS. Para ver la remoción de contaminantes en la fase de estabilización.

9.9 Diseño experimental

Para este estudio se utilizó un diseño de un factor para el análisis de los diferentes tipos de HA y controles. Las unidades experimentales en total fueron 4, de las cuales un eran un HAFL, un HAFS y 2 controles (un HL y un HS). los cuales fueron evaluados con el programa de statgraphics Centurión™ mediante un análisis de ANOVA simple, tabla 4.

Tabla 1. Factores evaluados en los humedales artificiales.

Factor (Flujos) 1	Factor (vegetación) 2						
	<i>Echinodorus paniculatum</i>						
FL	4	3	4	3	4	3	4
FS	4	3	4	3	4	3	4
HL	0	0	0	0	0	0	0
HS	0	0	0	0	0	0	0

10. RESULTADOS

Durante la fase de adaptación la vegetación de *Echinodorus paniculatus*, tuvo rápida aceptación y adaptación al agua residual ya que entre los primeros 4 y 8 días se observó el crecimiento foliar en la parte central. Transcurridos los dos meses de adaptación se obtuvieron en promedio un total de 50 plantas de las cuales fueron sembradas 30 de ellas.

Los resultados obtenidos corresponden a la eficiencia de la turbiedad, color, temperatura, pH, DO (ppm) y SDT que se obtuvo a partir de los tratamientos del reactor HAFL y en el reactor HAFS en la etapa de estabilización. De igual manera se llevó a cabo la comparación entre el HAFL-1 VS HAFS-2 evaluados en el STARGRAPHICS 7.0^{MR} para comprobar el comportamiento de los reactores.

10.1. Comportamiento de Temperatura y pH

La figura 18 nos muestra que el comportamiento de los parámetros de los reactores en la fase de adaptación y nos dice que no existe variación en los valores de temperatura con respecto al tiempo, ya que durante todo el día de monitoreo las temperaturas en los reactores fue similar.

Con los análisis realizados en el programa STARGRAPHICS 7.0^{MR} se observó que no existe diferencia estadística significativa con respecto al TC (se tomó en cuenta como dato de entrada en ambos reactores), HAFL y HAFS.

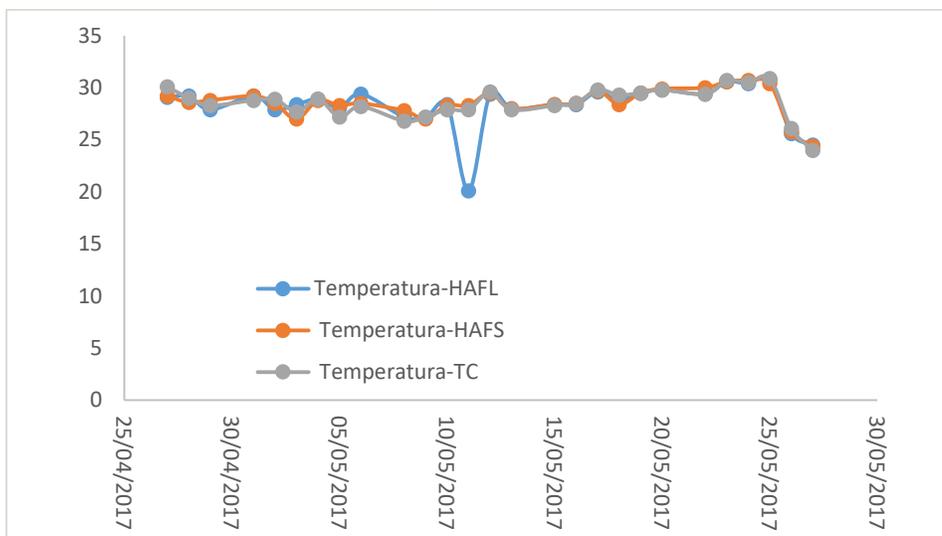


Figura 18. Comportamiento de temperatura en los HA.

10.2. Comportamientos del pH

La figura 19 nos muestra que no existe variación en los valores de pH con respecto al tiempo en los reactores HAFL y HAFS con respecto al TC, por lo que en los días de monitoreo el comportamiento de pH en los reactores fue similar.

Con los análisis realizados en el programa STARGRAPHICS 7.0^{MR} se observó que no existe diferencia estadística significativa con respecto al TC, HAFL y HAFS.

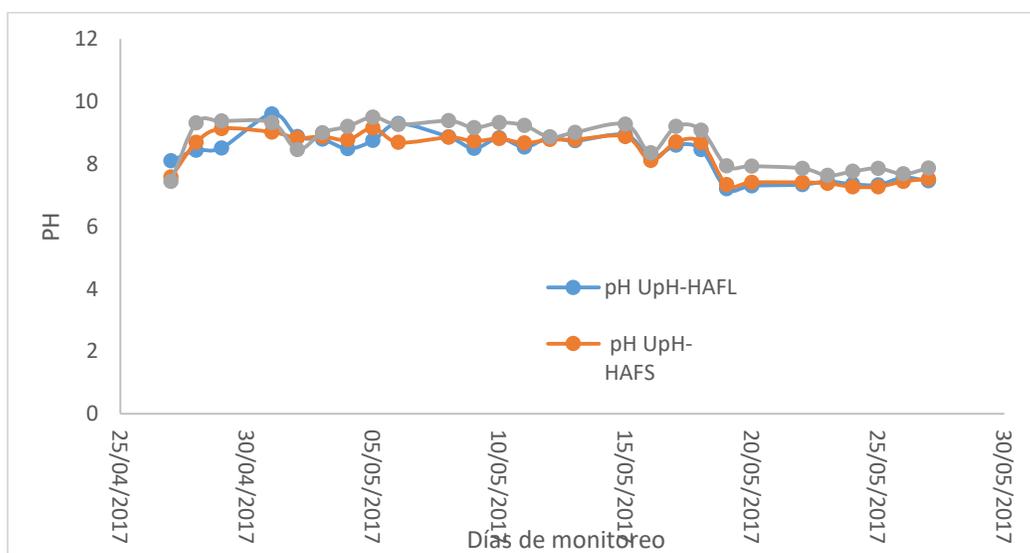


Figura 19. Comportamiento del pH en los HA.

10.3. Comportamiento de CE (μs) en los HA

La figura 20 nos muestra que existe variación en los valores de CE (μs) con respecto al tiempo en los dos reactores de HAFL y HAFS, por lo que en los días de monitoreo la CE (μs) en los reactores se comportó de diferente manera, a partir del segundo mes la CE comenzó a descender, esto nos muestra que la vegetación se encuentra estable y de igual manera ambos reactores se estabilizaron a la par durante los dos meses.

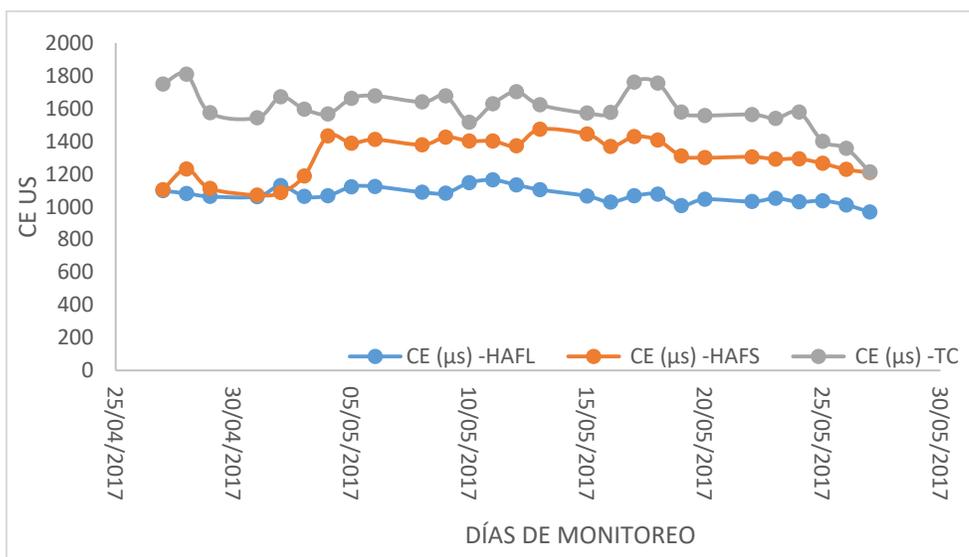


Figura 20. Comportamiento de CE (μs) en los HA.

10.4. Análisis estadísticos de CE (μs) en STARGRAPHICS 7.0^{MR}

El análisis de varianza (ANOVA) de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ($P > 0.0016$) entre los valores promedios de la variable CE (μs) de los diferentes tratamientos de humedales artificiales evaluados (HAFL-1, HAFS-2 y TC) con un 95% de confiabilidad. Figura 21.

De igual manera que en el análisis se puede apreciar que es de tipo no paramétrico de acuerdo al gráfico de caja y bigotes.

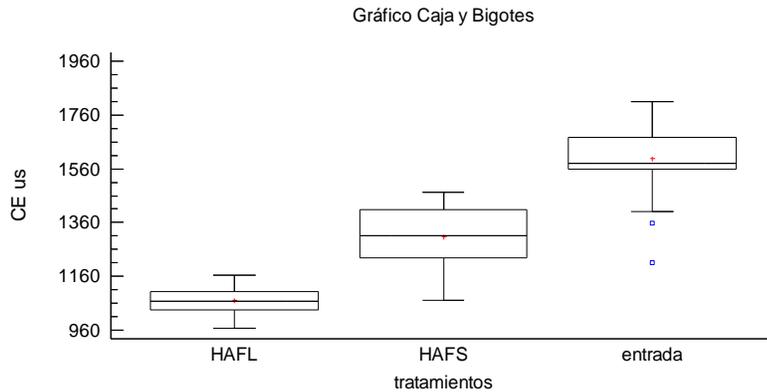


Figura 21. Comportamientos de la CE (μ s) en la etapa de estabilización.

10.5. Comportamiento de ORP (mv) en los HA

La figura 22 nos muestra que existe variación en los valores de ORP (mv) con respecto al tiempo en las unidades experimentales, por lo que en los días de monitoreo el ORP en los reactores no fue similar, el HAFL vario mucho en los días monitoreados a diferencia del HAFS y el TC que fueron similares durante la etapa de estabilización.

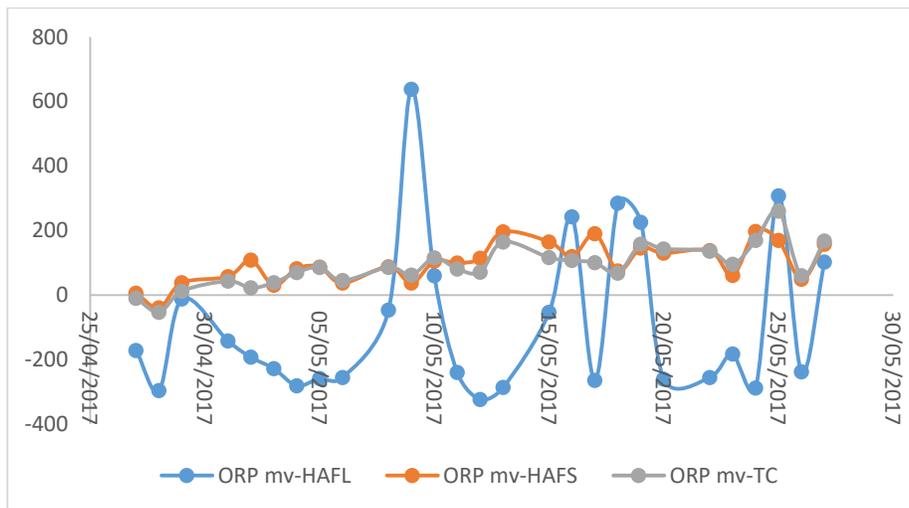


Figura 22. Comportamiento de la ORP (mv) de los HA.

10.6. Comportamiento de Turbiedad.

La figura 23 muestra la turbiedad del afluente y efluente en promedio para cada uno de los diferentes tratamientos durante el periodo de estabilización. A partir de la semana 4 en adelante se observó menos variación de este parámetro, indicando que las plantas y microorganismos dentro del sistema han llegado a una etapa de equilibrio. La turbidez es usada para asegurar la claridad del agua (Noyola *et al.*, 2000), y muy útil como indicador de la calidad del agua (NMX-AA-038-SCFI-2000) y es además un indicador para saber la remoción de contaminantes presentes en el agua al igual que el color, los SDT, DBO, entre otros.

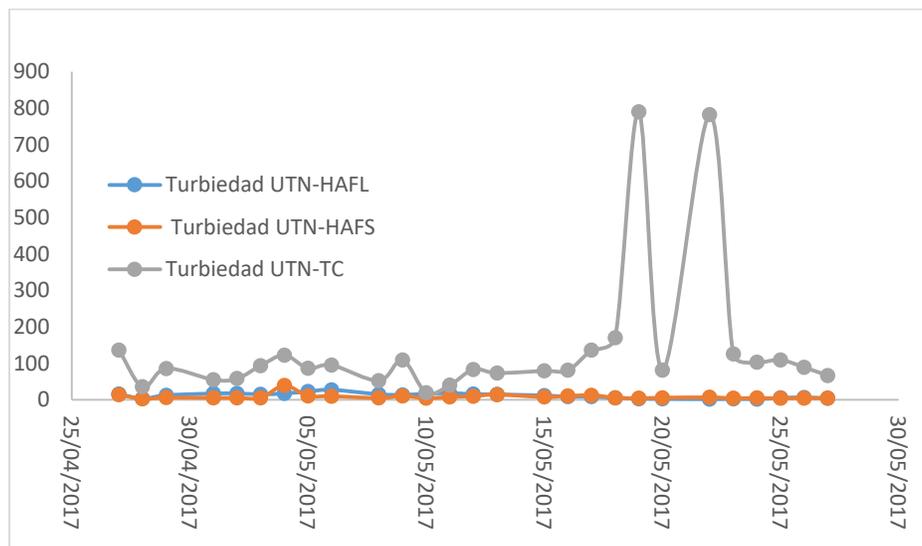


Figura 23. Comportamiento de la turbiedad (UTN) en los HA.

10.7. Comportamiento de color.

La figura 24 muestra el comportamiento del color (U.C) en el afluente. A partir de la semana 5 en adelante se observó menos variación de este parámetro hasta la semana 7 indicando que las plantas y microorganismos dentro del sistema han llegado a una etapa de equilibrio. Este parámetro es usado para determinar la presencia de agentes colorantes sintéticos y naturales en el agua (Noyola *et al.*, 2000).

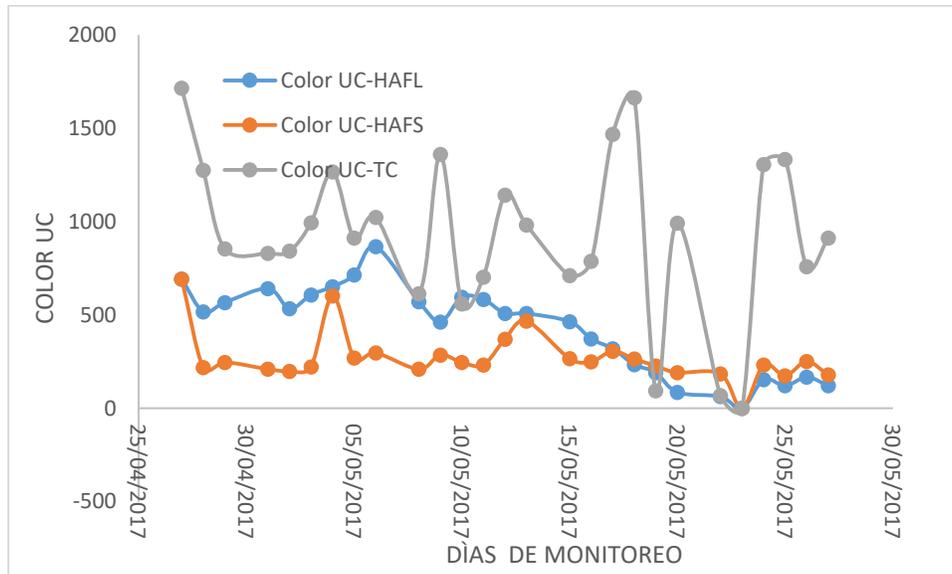


Figura 24. Comportamiento de Color (UC) en los HA.

10.8. Análisis estadísticos de Turbiedad y Color en STARGRAPHICS 7.0^{MR}

El análisis de varianza de una clasificación por rangos de Kruskal – Wallis, para el contraste de medianas en medición de la turbiedad y color, en los diferentes humedales artificiales (HAFL y HAFS) de la etapa de adaptación, indica que existen diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos ($P=0$).

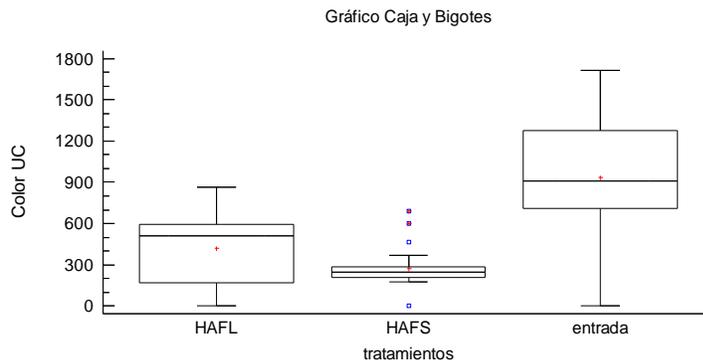


Figura 25. Valores de medianas de la Turbiedad (UTN). En todos los casos $n=36$.

El comportamiento de color según la figura 26, nos muestra que no existe diferencia estadística significativa, por lo tanto en la fase de adaptación de la vegetación son similares y esto muestra que en ambos reactores son factibles para ser utilizados según los requerimientos del operador en plantas pilotos, utilizando la vegetación de *Echinodorus paniculatus*.

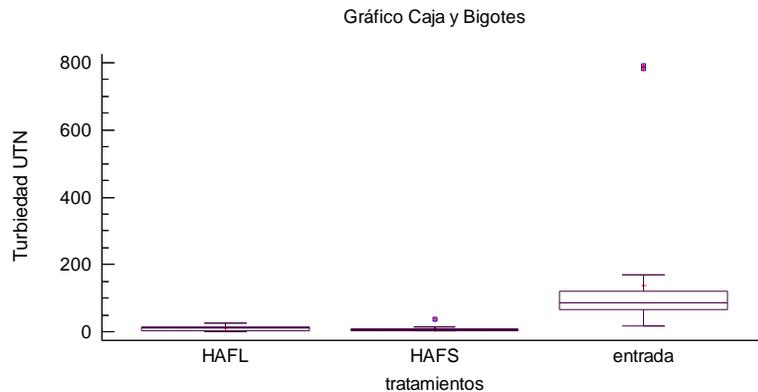


Figura 26. Valores de medianas de la Turbiedad (UTN). En todos los casos n=36.

10.9. Comportamiento de SDT en los HA.

En la siguiente figura se puede apreciar el comportamiento de los SDT que se presentan la fase de estabilización, a partir del Segundo mes comenzo a decender la presencia de solidos disueltos totales. Esto es un indicador que nos permite apreciar la eficiencia de remoción y al mismo tiempo la estabilización de la vegetación que se esta estudiando, por lo tanto; la plata *Echinodorus paniculatus* se adapta muy bien en los reactores y es una alternativa factible para ser utilizado en futuras plantas pilotos.

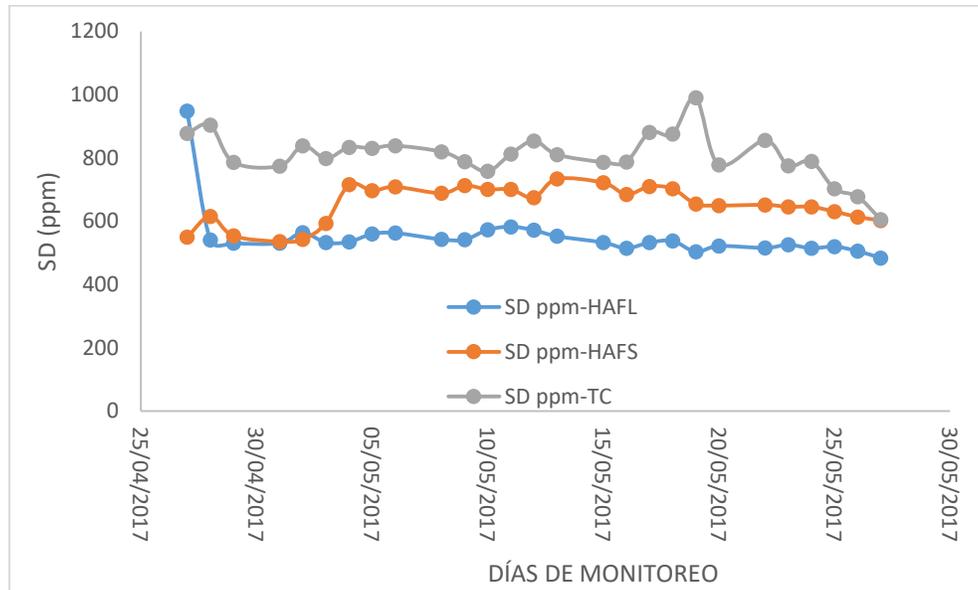


Figura 27. Comportamiento de SDT en la fase de adaptación de los HAFL y HAFS.

10.10. Análisis estadísticos de SDT en STARGRAPHICS 7.0^{MR}

El comportamiento de SDT según la figura 27, nos muestra que no existe diferencia estadística significativa, por lo tanto en la fase de adaptación de la vegetación son similares y esto muestra que en ambos reactores tienen son factibles para ser utilizados de manera independientes y según se requiera. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza.

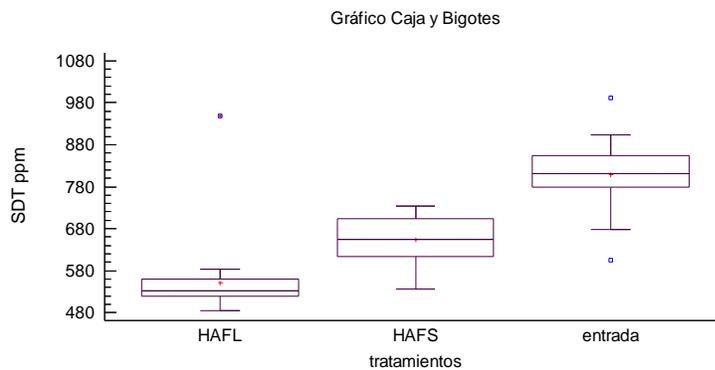


Figura 28. Valores de medianas de la Turbiedad (UTN). En todos los casos n=36.

10. CONCLUSIÓN

Como conclusión se puede decir que la vegetación *Echinodorus paniculatus*, se adaptó bien a las unidades experimentales, por lo tanto muestra eficiencia de remoción de color, turbiedad, SDT, CE y ORP más visible en el HAFL.

Es importante mencionar que esta vegetación se reproduce asexualmente a través de sus panículas y es más evidente en el HAFS que en el HAFL.

Como ya se había mencionado anteriormente este sistema es factible en cuanto al tratamiento de las aguas residuales, y la captación de metales pesados, solo se tiene que dar el seguimiento de un correcto manejo de las válvulas esto para que el humedal tenga el tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 7 días y las plantas junto con las bacterias puedan remover los contaminantes.

Cabe mencionar que los materiales utilizados para la realización de este proyecto son accesibles incluyendo la vegetación que es nativa y no tiene ningún costo.

El objetivo principal de este proyecto era demostrar que los humedales son excelentes sistemas de depuración de aguas residuales y con casi los mismos resultados que los tratamientos convencionales pero con un menor costo de operación y sin embargo podemos concluir de manera formal este experimento en cuanto a la adaptación de la vegetación.

11. RECOMENDACIONES

- Se debe de dar un correcto mantenimiento a los humedales, esto se puede hacer cortando la vegetación muerta para evitar que estas mismas aporten color y turbiedad al momento de tomar las muestras y a lo largo del periodo experimental y así no altere los resultados.
- Realizar el control de plagas para evitar la pérdida de especies en los reactores.
- Limpiar constantemente los reactores para evitar la proliferación de algas que crecen por arriba del agua en el caso de los HAFL.
- Verificar que las válvulas se encuentren reguladas para que el humedal trabaje correctamente y tenga el tiempo de retención hidráulico de 7 días.
- Cambiar la vegetación cada determinado tiempo, ya que con el paso de los meses o años esta al tener exceso de contaminantes se satura su capacidad de absorción y la hace cada vez más lenta en la asimilación de contaminantes.

12. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS

Las competencias desarrolladas a lo largo del proyecto fueron el trabajo en equipo ya que a cada quien se le asignaron responsabilidades y realización de las actividades con los compañeros, los principales temas que se discutían fueron acerca del mantenimiento, operación y análisis de los humedales artificiales.

Se realizaron pequeños seminarios acerca de la investigación en curso del proyecto para la correcta recopilación de información en cuanto al mantenimiento, operación y análisis de los humedales artificiales sobre cuales se basaron prácticamente en la resolución de los posibles problemas que pudieran presentarse y así poder estar preparados ante cualquier circunstancia.

De igual manera se recibieron cursos de capacitación para un correcto manejo de los equipos al momento de leer los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales y evitar errores de edificio por equipos descalibrados.

También fue necesario tener responsabilidad con uno mismo ya que el uso adecuado del equipo de protección personal dentro y fuera del laboratorio fue fundamental para la realización de las diversas actividades antes mencionadas y así evitar accidentes que pudieran poner en riesgo la integridad física.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Andreo, P. (2010). Evaluación y Diseño de un Humedal Construido para la Depuración de Aguas Residuales Domésticas, facultad de química, universidad de Murcia. Pp: 22-49.

ArgenBio (2007). Consejo Argentino para la información para el Desarrollo de la Biotecnología. Recuperado en 07 de enero de 2015 de <http://www.argenbio.org/index.php?action=acerca&opt=2>.

Arias, O. (2004). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Tesina, Barcelona.

Ariza H. (Ed.), Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados (M. Camargo, y L. P. Pardo, Trans., primera ed., Vol. 2, p. 570). Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S. A.

Arias I., C. A., y Hans Brix, I. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 17-24.

CONAGUA (2013). Estadística del Agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México.

Crites, R., y Tchobanoglous, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. In R. Crites, G. Tchobanoglous, y E.

Delgadillo et al., 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Bolivia: s.n.

EPA (1988). Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment| US EPA. <http://yosemite.epa.gov/water/owrccatalog.nsf>,. 225, 226, 229, 230, 231, 232, 235.

EPA (USA Environmental Protection Agency), (2000b). Folleto informativo de sistemas descentralizados: tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. EPA 832-F-00-024. Washington, D.C.

EPA (USA Environmental Protection Agency), (2000c). Folleto informativo de sistemas descentralizados: tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. EPA 832-F-00-023. Washington, D.C.

Gallegos, R., (2017). Tratamiento de aguas residuales domesticas en humedales artificiales de flujo libre con *Sagitaria latifolia* y *Sagitaria lancifolia*. Tesis de maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División Académica de Ciencias Biológicas.

Hafeznezami, S., Kim, J. & Redman, J., (2012). Evaluating Removal Efficiency of Heavy Metals in Constructed Wetlands. Journal Of Environmental Engineering, 138(4), 475-482.

Hammer DA, (1989). Constructed wetland for wastewater treatment. Chelsea, Michingan: Lewis Publisher. Pp: 494.

Hans Brix, I. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 17-24.

Kasselmann, C. (2001). *Echinodorus*, die beliebtesten Aquarierpflanzen. Dähne Verlag, Ettlingen.

Lara, B.J.A. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña -Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona

Lehtonen, S. & L. Myllys. 2008. Cladistic analysis of echinodorus (Alismata-ceae): simultaneous analysis of molecular and morphological data. cladistics 24: 218-239.

Lehtonen, S. & L. Myllys. 2014. Cladistic analysis of echinodorus (Alismata-ceae): simultaneous analysis of molecular and morphological data. cladistics 24: 218-239.

López, G., J.R. Hernández, R.G. Margulis, C.A. Torres & E. Cruz. (2014). Diseño y evaluacion de parametros de control en sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco.

Luna Pabello, V. M. (2015). Humedal Artificial. Una ecotecnia prehispánica para el manejo sustentable del agua. Asociación Autónoma del Personal Académico de la UNAM, 175-185.

Mena, J., Rodríguez, L., Núñez, J. F. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA 2008. Madrid, España.

Méndez, A., (2014). Construcción, Arranque y Estabilización de Humedales Artificiales de Flujo Libre y Subsuperficial a Escala Piloto para el Tratamiento de Aguas Residuales. Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División Académica de Ciencias Biológicas.

Mendonça, S. (2000). Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío, Mc. Graw Hill, Santafé de Bogota.

Mihelcic, J., y Zimmerman, J., (2012). Ingeniería ambiental. Fundamentos-Sustentabilidad-Diseño. En J. R. Mihelcic, y J. Beth Zimmerman, Ingeniería ambiental. Fundamentos-Sustentabilidad-Diseño (p. 463). México D.F: Alfaomega.

Munguía-Balvanera, Blanco-Piñón y Alavez-Ramírez (2016). Analisis hidrodinámico de rejas de canales mediante simulación numérica bidimensionales.

NMX-AA-034-SCFI-2001 (2001). Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Análisis de agua. (S. d. Economía., Ed.) México D.F., México.

NMX-AA-007 (1980). Aguas, Determinación de la temperatura, método visual con termómetro, publicado en el Diario oficial de la Federación el 23 de Julio de 1980.

NMX-AA-008-SCFI-2000 (1980). Análisis de agua. Determinación de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 25 de Marzo de 1980.

NMX-AA-036-SCFI-2001 (1984). Determinación de la conductividad electrolítica método de prueba, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de Marzo de 1984.

NMX-AA-038-SCFI-2001 (1981). Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de julio de 1981

NOM-001-SEMARNAT-1996 (1996). Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México D.F., México.

Noyola R. A., Vega G. E., Ramos E. J. G., Calderón M. C. G. (2000). Alternativas de tratamiento de aguas residuales. Manuales IMTA. Morelos, México. 401 pp.

OEFA (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. En Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Consultado el 13 de noviembre de 2014. Disponible en <http://www.oefa.gob.pe/publicaciones/aguas-residuales>

Osnaya, R; M. (2012). Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la universidad de la sierra Juárez. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Sierra Juárez (UNSIJ). Oaxaca de Juárez, Oaxaca. 174 p.

Pott, V.J. y A. Pott. (2000). Plantas acuáticas do pantanal. Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia Brasília, DF.

Romero, J., (2002). Calidad del Agua., 1a. ed., Bogotá-Colombia., Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería., Pp. 67, 69, 71-74, 156-158, 160.

Ross-Larson, Coquereaumont, and Trott, (2006). Eds., Informe sobre Desarrollo Humano 2006. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Available:

http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2006_es_completo.pdf

Sainz, J., (2005). Tecnologías para la Sostenibilidad: Procesos y Operaciones Unitarias en Depuración de Aguas Residuales., 1a. ed., Madrid-España., Fundación EOI Gregorio del Amo., Pp. 34, 43, 45, 46.

Sanabria, O. (2010). Innovative Alternative of Low Cost to Purify Waterwaster in Countries in Via of Development. Universidad de Pamplona. Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo.

Saeed, T. y Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Journal of Environmental Management, 112, 429-448.

Secretaría de la Convención de Ramsar, (2006). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4th ed. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). 75

Seoáñez Calvo, Mariano y Seoáñez Mariano. (2005). Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo: soluciones reales, viables,

razonadas y contrastadas que ponen en evidencia la desastrosa gestión de las aguas residuales en España. Mundi Prensa Libros, 464 p. ISBN 9788484762263.

Villarroel, C. (2005). Tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales. El cortijo para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial. XXI congreso interamericano de ingeniería química.