

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS



CAMPUS CÓRDOBA

MAESTRÍA EN PAISAJE Y TURISMO RURAL

**IMPLEMENTACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS GRISES EN EL CENTRO ECOTURÍSTICO PLAYA LA JUNTA,
AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ**

TESINA PRESENTADA POR:
RAÚL CASTELÁN CABAÑAS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN PAISAJE Y TURISMO RURAL

AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ, MÉXICO

Septiembre de 2017

**IMPLEMENTACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES EN EL CENTRO
ECOTURÍSTICO PLAYA LA JUNTA, AMATLÁN DE LOS REYES,
VERACRUZ**

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe **Raúl Castelán Cabañas**, alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección de la **Dra. Roselia Servín Juárez**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesina “**Implementación de un humedal artificial para el tratamiento de aguas grises en el Centro Ecoturístico Playa La Junta, Amatlán de Los reyes, Veracruz**” y los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Amatlán de los Reyes, Veracruz a 18 de septiembre de 2017



Raúl Castelán Cabañas



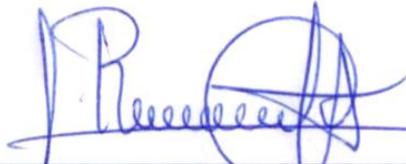
Vo. Bo. Consejera de Tesina
Dra. Roselia Servín Juárez

La presente tesina, titulada: “**Implementación de un humedal artificial para el tratamiento de aguas grises en el Centro Ecoturístico Playa La Junta, Amatlán de Los reyes, Veracruz**”, fue realizada por el alumno Raúl Castelán Cabañas, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN PAISAJE Y TURISMO RURAL

CONSEJO PARTICULAR:

DIRECTORA Y
CONSEJERA:



DRA. ROSELIA SERVÍN JUÁREZ

CO-DIRECTOR:



DR. JOSÉ LUIS MARÍN MUÑIZ

ASESOR:



DR. JUAN ANTONIO PÉREZ SATO

Amatlán de los Reyes, Veracruz. Septiembre de 2017

IMPLEMENTACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES EN EL CENTRO ECOTURÍSTICO PLAYA LA JUNTA, AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ

Raúl Castelán Cabañas

Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

Una de las alternativas sustentables para aminorar los impactos de la contaminación generada por las aguas residuales en zonas rurales, son los Humedales Artificiales (HA), los cuales, además de la función ecológica que desempeñan, su bajo costo y de la accesibilidad en el diseño y construcción, pueden ser un complemento en proyectos de turismo de naturaleza, que propician beneficios económicos y una mejora en la calidad visual del paisaje.

De esta manera, se implementó un HA en el Centro Ecoturístico Playa la Junta, para el tratamiento de aguas grises que se vertían en el Río Atoyac, para incentivar el manejo sustentable de agua en la región. Además de proporcionar información antes no descrita, referente al estado del arte de los HA en México.

La metodología consistió en crear un diseño de HA adaptado a los requerimientos de un proyecto de turismo de naturaleza con un policultivo de plantas ornamentales. Posteriormente se impartió un taller con actores clave de la región, para transmitir el conocimiento adquirido y fomentar cuidado del agua.

Se concluye que para el éxito de un proyecto de saneamiento de agua con HA, es necesaria la constante participación en el proceso de diseño y construcción por parte de los usuarios directos de esta ecotecnología e incluir un beneficio adicional en el sistema de tratamiento, como las plantas ornamentales.

Palabras clave: agua, humedal artificial, turismo de naturaleza, centro ecoturístico, zona rural

IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTED WETLAND FOR THE TREATMENT OF GRAYWATER IN THE ECOTOURISTIC CENTER PLAYA LA JUNTA, AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ

Raúl Castelán Cabañas

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

One of the sustainable alternatives to reduce the impacts of pollution generated by wastewater in rural areas are the Constructed Wetlands (CW), which, in addition to the ecological function they play, its low cost and accessibility in design and construction, can be a complement in projects of nature tourism, which provides economic benefits and an improvement in the visual quality of the landscape.

In this way, a CW was implemented at the *Centro Ecoturístico Playa la Junta*, for the treatment of gray waters that were dumped in the Atoyac River, to encourage the sustainable management of water in the region. In addition, the research provides information not previously described, referring to the state of the art of CW in Mexico.

The methodology consisted in creating a CW design, adapted to the requirements of a nature tourism project with a polyculture of ornamental plants. Subsequently, a workshop was held with key stakeholders in the region, to convey the knowledge acquired and promote water care.

It was concluded that for the success of a water sanitation project with CW, it is necessary the constant participation in the design and construction process by the direct users of ecotechnology and to include an additional benefit in the treatment system, such as ornamental plants.

Keywords: water, constructed wetland, nature tourism, ecotourism center, rural area

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, por haberme dado la oportunidad de estudiar en una institución educativa de excelencia.

A la Dra. Roselia Servín Juárez por su apoyo incondicional académico y personal durante el tiempo del programa de maestría. En especial, por confiar en el proyecto y aceptar posterior a diversos cambios a ser consejera académica y directora de la tesina en turno.

Al Dr. José Luis Marín Muñiz, por su apoyo durante mis estudios e investigaciones realizados en el Colegio de Veracruz, A.C. sobre todo por compartir indistintamente y con gran entusiasmo sus amplios conocimientos en humedales artificiales y en diversas ecotecnologías.

Al Dr. Juan Antonio Pérez Sato, por su atención, esfuerzo y en especial por el respeto mostrado a través del soporte administrativo e intelectual desde el primer día de ingreso al programa de maestría en Paisaje y Turismo Rural.

A Alicia Cabañas García, mi maestra de vida y autora verdadera de este escrito y todo logro realizado hasta el momento, a través de su temple, entereza, honestidad e infinito cariño.

CONTENIDO

CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivo general	4
1.3.1 Objetivos específicos	5
CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES	5
2.1. Humedales artificiales (HA) para el tratamiento de aguas residuales	5
2.2. Tratamiento de agua residual con humedales artificiales en México.....	8
2.3. Humedales artificiales con plantas comunes de humedales naturales en México	9
2.4. Humedales artificiales con plantas ornamentales en México	15
2.5. Humedales artificiales aplicados en el sector turístico en el mundo	25
2.6. Humedales artificiales aplicados en el sector turístico en México	26
2.7. Tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales en proyectos ecoturísticos de la Zona Centro de Veracruz	29
CAPITULO III. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	34
3.1. Turismo en la zona rural	34
3.2. El patrimonio: base del turismo de naturaleza	36
3.3. El agua como pilar del patrimonio	38
3.4. Servicios que brinda el agua a la sociedad	40
3.5. La contaminación del agua y sus repercusiones al medio ambiente	43
3.6. Aguas residuales	45
3.6.1 Aguas negras.....	45
3.6.2. Aguas grises	46

3.7. Manejo de aguas residuales en proyectos de turismo de naturaleza	47
3.7.1. Aguas residuales e indicadores de sostenibilidad en turismo.....	48
3.7.2. Tratamiento de aguas residuales para la certificación mexicana de sustentabilidad en turismo	49
CAPÍTULO IV. ESTUDIO DE CASO DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN SAN JOSÉ PASTORÍAS, ACTOPAN, VERACRUZ	51
4.1. Introducción	51
4.2. Objetivos del proyecto	51
4.3. Ubicación de la zona de estudio	52
4.4. Descripción del Humedal Artificial en San José Pastorías	52
4.5. Metodología de aprendizaje de Humedales Artificiales	53
4.6. Conclusión.....	60
CAPÍTULO V. ESTUDIO DE CASO DEL CENTRO ECOTURÍSTICO PLAYA LA JUNTA	61
5.1. Ubicación del área de estudio.....	61
5.2. Centro Ecoturístico Playa la Junta	62
5.3. Servicios y actividades del Centro Ecoturístico Playa la Junta.....	63
5.4. Vinculación con otros sectores	64
CAPITULO VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	65
6.1. Etapa 1. Elección del sitio.....	65
6.2. Etapa 2. Diseño del Humedal Artificial	66
6.3. Etapa 3. Construcción del Humedal Artificial	66
6.4. Etapa 4. Taller de diseño de humedales artificiales	67

CAPÍTULO VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
7.1. Elección del sitio	67
7.2 Diseño del humedal artificial	71
7.2.1. Variables a considerar para la implementación del humedal artificial... 71	
7.2.1.1. Tipo de agua a tratar.....	71
7.2.1.2. Volumen de aguas grises generadas por día	72
7.2.1.3. Ubicación del humedal artificial.....	73
7.2.1.4. Tipo de suelo	74
7.2.1.5. Destino del agua tratada	74
7.2.1.6. Multifuncionalidad del sistema	75
7.2.2. Características del sistema de tratamiento	76
7.2.2.1. Tipo de humedal artificial	76
7.2.2.2. Dimensiones del sistema	79
7.2.2.3. Pretratamiento (trampa de grasas)	83
7.2.2.4. Tipo de sustrato	84
7.2.2.5. Tipos de plantas a utilizar	85
7.2.2.6. Diseño final	87
7.3. Construcción del humedal artificial	88
7.3.1. Programa de construcción	88
7.3.2. Materiales y costos	93
7.4. Taller educativo para la construcción del humedal artificial.....	95
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
8.1. Conclusiones	99
8.2. Recomendaciones	102
9. LITERATURA CITADA	103
ANEXO 1. Encuesta del taller de diseño de humedales	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Humedal de Flujo de Superficial	6
Figura 2. Humedal de Flujo Subsuperficial	7
Figura 3. Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical.....	7
Figura 4. Características de los diferentes segmentos del turismo de naturaleza.	35
Figura 5. Ubicación del Centro Ecoturístico Playa La Junta.....	61
Figura 6. Zona de restaurante y espacio para camping y recreación	62
Figura 7. Nacimiento del Río Atoyac.....	63
Figura 8. Mariposario abierto con plantas hospederas de mariposas	64
Figura 9. Colaboración del Centro Ecoturístico Playa la Junta con el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba.....	65
Figura 10. Ubicación de San José Pastorías, Actopan, Veracruz	52
Figura 11. Limpieza de humedales artificiales.	54
Figura 12. Reparación de fugas con cemento	55
Figura 13. PET como sustrato de plantas.....	56
Figura 14. Siembra de anturios y otras especies en los HA.....	57
Figura 15. Vertido de sustrato biológico y medición de flujo para TRH.....	58
Figura 16. Centro Agroecoturístico Tepexilotla	68
Figura 17. Unidad de Manejo Ambiental Tequecholapa	69
Figura 18. Centro Agroecoturístico e Investigación San Juan de la Punta.....	70

Figura 19. Centro Agroecoturístico Playa la Junta	71
Figura 20. Zanja de descarga de aguas grises al Río Atoyac	72
Figura 21. Material para prueba de porosidad	81
Figura 22. Proceso para calcular la porosidad del HA	81
Figura 23. Esquema de la trampa de grasas	83
Figura 24. Distribución de plantas de acuerdo a su eficiencia de remoción	86
Figura 25. Proceso de tratamiento de agua en el HA	88
Figura 26. Etapas de construcción de la estructura del HA.....	91
Figura 27. Construcción de la trampa de grasas e instalación de tubería	92
Figura 28. Actividades del taller "Diseño de Humedales Artificiales"	96
Figura 29. Conocimiento del impacto de las aguas residuales	97
Figura 30. Preferencias en la implementación de un HA en una localidad.....	98
Figura 31. Aplicabilidad de lo aprendido en el taller de diseño de humedales artificiales	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Humedales artificiales en México con plantas comunes en humedales naturales.....	10
Tabla 2. Humedales artificiales en México con plantas ornamentales.	18
Tabla 3. Manejo de las aguas residuales en proyectos de Turismo de Naturaleza ubicados en la zona Centro de Veracruz	32
Tabla 4. Principales Servicios Ecosistémicos Hidrológicos de Agua Dulce.	42
Tabla 5. Programación para la construcción del HA.....	88
Tabla 6. Costos y materiales para la construcción del HA en Playa La Junta.....	93
Tabla 7. Costos y materiales para la construcción de la trampa de grasas.	94

CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

Uno de los retos más importantes de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), son las descargas de aguas residuales sin tratamiento previo, las cuales afectan la salud humana, el clima, la biodiversidad, la calidad paisajística y los ecosistemas (Pisanty *et al.*, 2009).

En México, se estima que al menos tres de cada cuatro cuerpos de agua presentan niveles de contaminación altos debido principalmente a que 80% de las descargas de agua grises o negras de centros urbanos e industriales se vierten directamente en ellos (INECC, 2012).

En este sentido, es necesario el uso de ecotecnologías sustentables en México que permitan mejorar el abastecimiento y la calidad del agua, principalmente en zonas rurales¹, donde difícilmente existen plantas de tratamiento de aguas residuales o métodos alternativos de bajo costo que permitan cumplir con los objetivos básicos de saneamiento (Zurita-Martínez *et al.*, 2011).

Una de las alternativas sustentables para mejorar la calidad de cuerpos de agua, es el uso de Humedales Artificiales (HA), los cuales actúan como filtros biológicos. Éstos, consisten en una celda o canal poco profundo en el que se siembran plantas acuáticas que retienen sedimentos, nutrientes y contaminantes, además de que eliminan organismos patógenos mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Llagas-Chafloque y Guadalupe-Gómez, 2006).

La eficiencia de remoción de contaminantes de los HA han sido ampliamente evaluada en Europa, Estados Unidos y otras partes del mundo (Gopal, 1999; Kivaisi, 2001; Stottmeister *et al.*, 2003; EPA, 2004; Vymazal, 2010) sin embargo, en México, el uso de ésta ecotecnología es limitado, así como la implementación de plantas ornamentales en el mismo, siendo que éstas dan un valor agregado al HA.

¹ De acuerdo con INEGI (2010), una población se considera como zona rural cuando tiene menos de 2500 habitantes.

Comparado con los sistemas de tratamiento convencionales, los HA son de bajo costo, de fácil construcción y operación, así requieren de poco mantenimiento (Kadlec, 2009), cualidades que hacen de este sistema de tratamiento una alternativa atractiva para zonas rurales.

Así, tomando en cuenta que el agua es pilar fundamental del patrimonio natural y cultural (Toledo, 2006), el cuidado de ésta se convierte en una necesidad de suma importancia, no solo en proyectos vinculados al turismo de naturaleza, el cual depende de la calidad de ambos patrimonios, sino de toda la sociedad.

La presente investigación se centra en el manejo sustentable de aguas grises en proyectos de turismo de naturaleza en zonas rurales. En particular, se propone una alternativa accesible que permite reducir los efectos de la contaminación a cuerpos de agua.

En específico, se construyó un HA demostrativo para tratar las aguas grises en el Centro Ecoturístico Playa la Junta, también conocido como Playa la Junta, ubicado en el municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz. Derivado de esto, se impartió un taller de capacitación con pobladores de comunidades vecinas, representantes de centros ecoturísticos y actores claves de la región centro de Veracruz involucrados en el sector turístico, en proyectos de conservación, así como del ámbito académico.

Lo anterior permitió dar a conocer a los participantes en el taller, la técnica de construcción de un HA, su operación, mantenimiento y funcionalidad. El objetivo final fue que este modelo pueda ser replicado en diversas comunidades no solo Amatlán de los Reyes, Veracruz, sino de otras que requieran de un manejo sustentable de aguas residuales. Así mismo, se plantea que el propietario de Playa la Junta imparta pláticas informativas a turistas, estudiantes y visitantes interesados en conocer esta ecotecnología para el tratamiento de aguas grises.

1.2. Justificación

De acuerdo con Zurita-Martínez *et al.* (2011), el gobierno mexicano ha invertido una gran cantidad de recursos en construir drenajes, sin considerar métodos de tratamiento para las aguas residuales, lo que ha provocado que se colecten grandes volúmenes de aguas negras que se descargan sin tratamiento en ríos y arroyos cercanos, mismos que se emplean de forma directa en la agricultura, afectando negativamente la salud de las personas y el equilibrio de los ecosistemas.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010), el tema de las descargas de aguas residuales en zonas rurales de México es un problema común, donde, de las 47,233 localidades, solo 1833 (3.8%) cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales.

El cuidado de la calidad del agua en centros ecoturísticos, como Playa la Junta, es un beneficio social y contribuye al desarrollo de zonas con potencial turístico. En particular, este centro ecoturístico y otros que se encuentran en la región centro de Veracruz, dependen en gran medida de la belleza paisajística representada por el nacimiento del Río Atoyac, principal atractivo turístico de la región y fuente de abastecimiento de agua para diversas comunidades.

Es importante mencionar que Playa la Junta es un centro ecoturístico que promueve la conservación del agua, en éste caso del afluente del Río Atoyac y no representa una fuente importante de contaminación de aguas residuales. No obstante, este sitio cuenta con gran afluencia turística y es el de mayor reconocimiento y prestigio de la localidad de Ojo de Agua, Municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz y posiblemente de la zona, lo cual representa una gran oportunidad para hacer una mayor difusión de este centro y en particular, para dar a conocer a los pobladores de la zona y a turistas mexicanos y extranjeros, los beneficios que brinda un HA ubicado a orillas del Río Atoyac.

La implementación de la ecotecnología del HA en Playa la Junta, además de contribuir al tratamiento de aguas grises que se descargaban en el Río Atoyac, sirve como ejemplo para otros proyectos de turismo de naturaleza no solo en comunidades aledañas, sino en otros contextos de México, así como para pobladores de la zona, visitantes y personas interesadas en alternativas ecológicas

de manejo sustentable de agua, lo cual proyecta a Playa la Junta, como un centro ecoturístico de vanguardia en la región.

La construcción del HA en Playa la Junta permitirá a este centro ecoturístico tener un reconocimiento social como una empresa rural ecológica, lo cual puede ser un incentivo para otros proyectos similares, debido a que existe un nicho de mercado creciente de turistas interesados en el cuidado ambiental (García-Henche, 2005), que, con una adecuada difusión a través de estrategias de mercadotecnia, puede generar mayores visitas de turistas, lo cual puede ser traducido en mayores beneficios económicos. Aunado a que Playa La Junta cumpliría con uno de los requisitos más importantes de la norma NMX-AA-133-SCFI-2013 sobre *Requisitos y Especificaciones de Sustentabilidad del Ecoturismo*.

Adicionalmente, la investigación contribuye al escaso acervo de información científica en cuanto al estado del arte de los HA en México. En específico, recopila una serie de datos técnicos que permiten que cualquier persona interesada en el tema pueda identificar y comparar materiales, costos, plantas, sustratos, eficiencias de remoción, entre otros datos de HA en México antes no descritas. Aunado al vínculo que se puede desarrollar entre proyectos de turismo de naturaleza con HA, tópico donde se presenta un vacío de información considerable.

1.3. Objetivo general

Desarrollar un modelo demostrativo de manejo de aguas grises en Playa la Junta, para la generación de conocimiento sobre el manejo sustentable del agua, a través del aprendizaje teórico y práctico de los humedales artificiales.

1.3.1 Objetivos específicos

1.3.1.1. Realizar el estado del arte de los HA en México.

1.3.1.2. Presentar el estudio de caso de los HA de San José de Pastorías, Actopan.

1.3.1.3. Diseñar y construir un HA en Playa la Junta para el tratamiento de aguas grises.

1.3.1.4. Transferir la ecotecnología de Playa La Junta con representantes de diversos centros ecoturísticos en la zona central de Veracruz y con pobladores de comunidades vecinas a través de un taller demostrativo.

CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES

2.1. Humedales artificiales (HA) para el tratamiento de aguas residuales

Los HA son sistemas diseñados por el hombre a partir de la ingeniería ecológica, en los que se reproducen los procesos físicos, químicos y biológicos que suceden en los humedales naturales, con el propósito de eliminar o disminuir los

contaminantes presentes en los diferentes tipos de aguas residuales (Mitch y Gosselink, 2015). Se caracterizan por tener un suelo saturado de agua con presencia de flora y fauna, principalmente microorganismos, las cuales favorecen la remoción de dichos contaminantes (Kadlec y Wallace, 2009; Vimazal, 2010).

De acuerdo con Kadlec y Wallace (2009), existen tres tipos básicos de humedales artificiales:

1. Humedal de Flujo Superficial (FS). Es similar en apariencia a un humedal natural, en donde el agua está expuesta a la atmosfera y tienen áreas abiertas de agua. A diferencia de los otros dos tipos de HA, este puede tener plantas flotantes, sumergidas y emergentes.

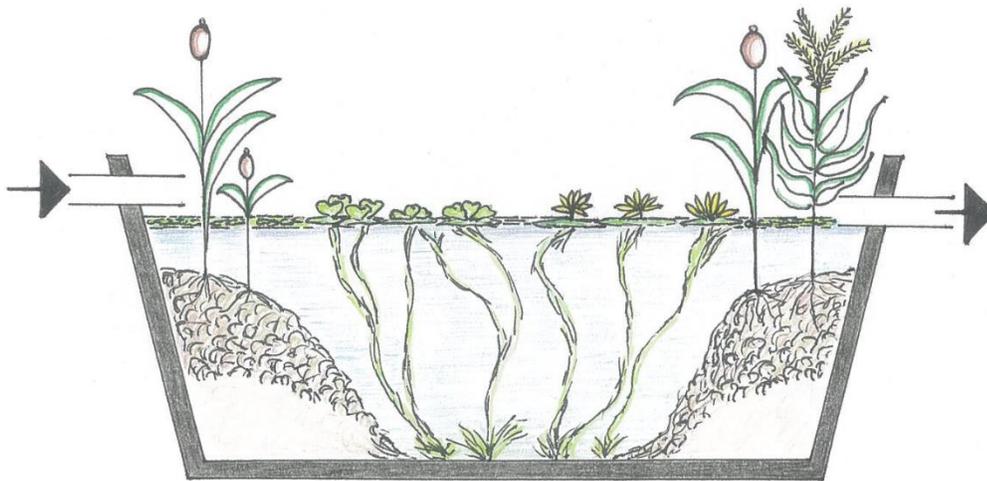


Figura 1. Humedal de Flujo de Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

2. Humedal Subsuperficial de Flujo Horizontal (SSFH): En este tipo de HA se emplea una cama de sustrato (grava, tezontle, entre otros), en donde se siembra vegetación emergentes (enraizada al sustrato). El agua se mantiene por debajo de la superficie del sustrato y su característica principal es que fluye horizontalmente desde la entrada a la salida.

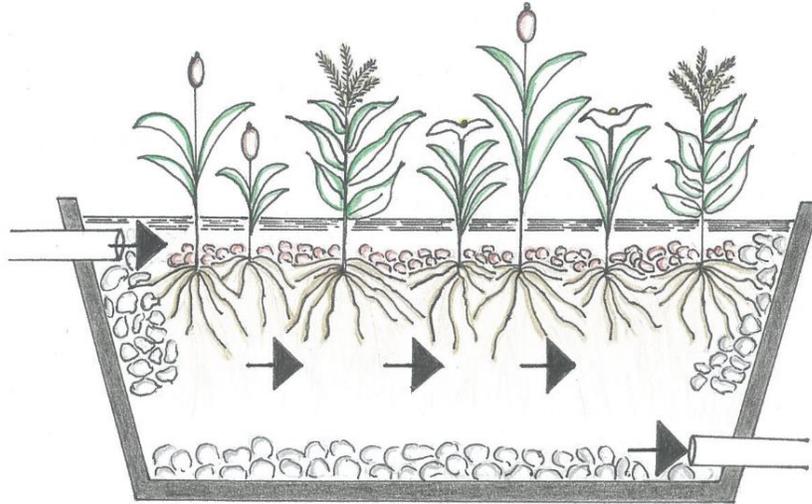


Figura 2. Humedal de Flujo Subsuperficial.
Fuente: Elaboración propia.

3. Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical (SSFV). La característica principal de este tipo de HA es que el agua a tratar se distribuye por todo el sistema, desde la superficie hacia el fondo. También se emplea una cama o relleno como sustrato, plantada con vegetación de plantas emergentes.

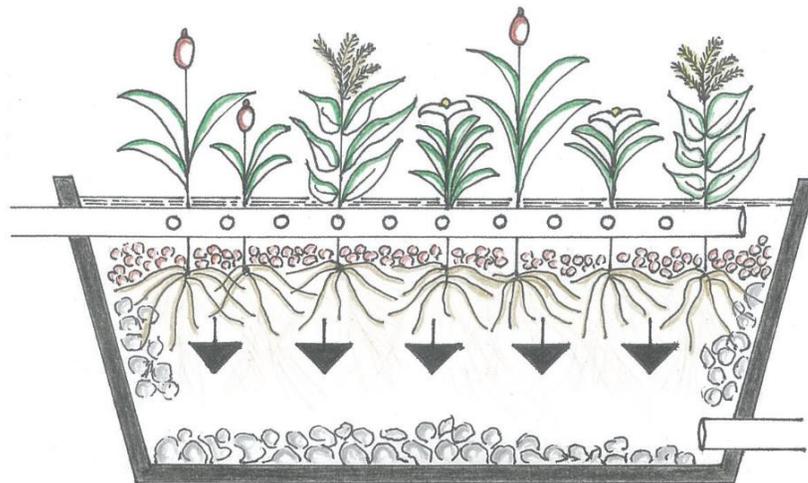


Figura 3. Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical.
Fuente: Elaboración propia.

Los HA pueden ser una alternativa viable para comunidades rurales, zonas industriales, comerciales y residenciales de países en vías de desarrollo, debido a

que estos sistemas son más flexibles en términos de mantenimiento, diseño y construcción (Kadlec, 2009; Zhang *et al.*, 2014).

Aunado a lo anterior, la inversión en un HA es mucho menor comparada con los métodos tradicionales utilizados en zonas urbanas, son ecológicamente sostenibles y tienen una alta eficiencia de remoción de contaminantes (Brix, 1999; Tanner *et al.*, 2002; Otterpohl *et al.*, 2013).

Además, de acuerdo con Zhang *et al.* (2014), una característica clave que favorece aún más la implementación de los HA en países en vías de desarrollo, es que la gran mayoría de éstos se encuentran en zonas tropicales y subtropicales, con climas cálidos y una alta biodiversidad, como es el caso de México.

De esta manera, las condiciones climáticas y biológicas de zonas tropicales y subtropicales favorecen el desarrollo de la actividad microbiana, así como el crecimiento óptimo de una gran variedad de plantas de humedales, ornamentales o naturales, lo cual se traduce en una mayor eficiencia de remoción de contaminantes sin emplear ningún recurso extra, más el que provee la naturaleza y un valor agregado con el uso de plantas ornamentales con valor comercial y estético (*ibíd.*).

2.2. Tratamiento de agua residual con humedales artificiales en México

De acuerdo con la CONAGUA (2013), dentro de los diversos métodos de tratamiento de agua residual que existen en México, los HA se posicionan en los últimos lugares. Al respecto, existen aproximadamente solo 69 HA y otros 101 combinados con otros tipos de tratamiento en uso.

De acuerdo con datos del Censo Poblacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010), 77.8% de la población mexicana vive en zonas urbanas y 22.2% en zonas rurales, donde los métodos de tratamiento convencionales de agua, como las plantas de tratamiento por lodos activados difícilmente se implementan, debido a los altos costos que implica su construcción, operación y mantenimiento (Zurita-Martínez *et al.*, 2011).

A pesar del limitado desarrollo de los HA como una alternativa de tratamiento de aguas residuales en México, existen algunos esfuerzos del sector académico, en donde se dan a conocer los beneficios y la gran viabilidad que tienen los HA en zonas rurales. Infortunadamente dichos esfuerzos no han sido suficientes para que estos sistemas de tratamiento de aguas residuales sean implementados de manera sistemática en el país (García-García *et al.*, 2016).

En este sentido, Hernández (2013), menciona que solo 7% de los HA operan de manera real el tratamiento de aguas residuales, el resto son experimentos científicos, que generan conocimientos y son de gran utilidad, pero difícilmente se aplican en comunidades de manera tangible.

2.3. Humedales artificiales con plantas comunes de humedales naturales en México

Dentro de las modalidades de los tipos de HA existentes, es posible utilizar diversos sustratos y ejemplares de plantas para el tratamiento de aguas residuales. De esta manera, los HA se pueden diferenciar en cuanto a la utilización de especies de plantas que se encuentran de manera natural en los ecosistemas de humedales alrededor del mundo o con la utilización de plantas ornamentales, que no necesariamente se desarrollan en estos ecosistemas, pero presentan adaptaciones a condiciones húmedas (Hernández-Alarcón, 2016).

La información que se presenta en el siguiente apartado, es referente a la utilización de plantas de ecosistemas de humedales naturales utilizados en HA en México. Cabe mencionar que a pesar de que en México existe más información documentada de este tipo, solo se tomaron en cuenta los que contienen información suficiente para los fines prácticos de este trabajo.

A continuación, se muestra un resumen de las investigaciones de HA en México para el tratamiento de aguas residuales que utilizan exclusivamente plantas características de ecosistemas de humedales naturales.

Tabla 1. Humedales artificiales en México con plantas comunes en humedales naturales.

Tipo de HA	Vegetación utilizada	Ubicación	Área (m ²)	Tipo de agua	TRH (día)	Flujo (m ³ /d)	Tipo de sustrato	Pre-tratamiento	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
SSFH	<i>Pontederia sagittata</i>	Xalapa, Veracruz	0.90	Residual de la producción de etanol de caña de azúcar	5	0.72	Grava volcánica	Directo	DQO: 80 NTK: 76 SO ₄ : 68	Olguín et al., 2008
Sistemas por separado : SSFH FS	<i>Typha sp</i>	Xalapa, Veracruz	Cada uno 1.5	De río cargada de urbanas e industriales	5	-	SSFH: grava volcánica FS: suelo	Directo	SSFH DQO:73 N-NH ₄ : 95 FS DQO:515 N-NH ₄ : 70	Hernández y Ruíz, 2010
Híbrido: TS– SSFV– SSFH–	<i>Typha latifolia</i> <i>Phragmites australis</i>	Santa Fe de la Laguna, Michoacán	9180	Municipal	TS: 0.52 SSF H: 4	259.2	Tezontle	Filtro de arena Tanque séptico (TS)	DBO: 94-98 DQO: 91-93 SST:	Rivas et al., 2011

LM-
SSFHP

LM:
5.5
SSF
HP:
0.5

93-97
NTK:
56-98

SSFH	<i>Phragmites australis</i> <i>Typha latifolia</i>	Atlixco, Puebla	3.64	Agua resultante del pelado de vegetales de una empacadora	5	-	Grava y tezontle	Rejillas para la remoción de sólidos gruesos, un sedimentador y posterior al SSFH una celda rellena de arena	DBO: 93.9 DQO: 92	Navarro et al., 2012
SSFH	<i>Phragmites australis</i> <i>Typha domingensis</i>	Cuernavaca, Morelos	1.62	Mezcla de aguas de sanitarios, jabonosas y de laboratorio	5	-	Tezontle y arena	Fosa séptica	DQO: 93 PT: 31 N-NH ₄ : 81.7	Romero-Aguilar et al., 2009
SSFH	<i>saccharum officinarum</i>	Tapachula, Chiapas	1.4	Residuales de beneficio de café	12	0.016	Grava y arena	Directo	DQO: 90 DBO: 40 NT: 83 PT: 97 CT: 88 CF: 89	González-Roblero, 2012

SSFH	<i>Eleocharis macrostachya</i> <i>Shoenoplectus americanus</i>	Chihuahua	1.5	Sintética preparada con agua de pozo adicionada de Arsenito de Sodio	2	-	Arena limosa	Directo	Retención de As 69.5	Alarcón-Herrera et al., 2014
HF	<i>Pontederia sagittata</i> <i>Cyperus papyrus</i>	Xalapa, Veracruz	50.5	Lago urbano	-	-	-	Directo	DQO: 71.7 SDT:40 N-NH ₄ : 27 N-NO ₃ : 61.4	Olguín et al., 2014
Híbrido: SSFH-Laguna-SSFH	<i>Typha latifolia</i> <i>Phragmites australis</i>	CDMX	18.3	Pretratadas en plantas y negra	-	7.86	Grava volcánica	Planta de tratamiento	Remoción de materia orgánica: 65	Barceló et al., 2014
SSFH	<i>Pontederia cordata</i> <i>Phragmites australis</i>	Villahermosa, Tabasco	24	Residual de centro educativo	7	1.6	Grava	Directo	DBO: 95.44 DQO: 95.32 PT: 81 SST: 94 Turb: 91.6 Color: 81	Marín-Acosta et al., 2016

SSFH FL	SSFH: <i>Paspalum paniculatu m Cyperus articulatus</i> FL: <i>Typha latifolia</i> <i>Eichhornia crassipes</i>	Villahermo sa, Tabasco	36	Residual de centro educativo	SSF H: 7.5 FL: 5.5	2.4	Grava	Directo	Turb:97 Color:83 DQO: 97 DBO:97 NT:97 PT: 91 SST: 97	Solís-Silván et al., 2015
SSFV	<i>Phragmites australis</i> <i>Gladiolus spp</i> <i>Typha latifolia</i>	Tepatitlán de Morelos, Jalisco	-	Doméstica	7	.015	-	Desarenado r y trampa de sustancias ligeras	DQO: 87 NT: 64 PT: 76 Grasas y aceites: 60	Castañeda- Villanueva y Flores- López, 2013
Híbrido SSFH-FL	<i>Typha Domingensi</i> s	Yuríria, Guanajuat o	5.1	Municipal	SSF H: 3 FL: 6	0.025	FL: tierra SSFH: grava	Filtro percolador	SSFH: DBO: 83.8 NTK: 31.3 PT: 30.8 FL: DBO: 60.8 NTK: 10.4 PT: 42.2	Merino- Solís y Cárdenas- Mijangos, 2008
FL	<i>Scirpus americanus</i>	CDMX	7.2	Tratada mezclada	45	-	Tezontle	Planta de tratamiento	DQO: 71 Calcio: 91 Cloruro: 77	Martínez et al., 2003

	<i>Typha latifolia</i> <i>Eichornia crassipes</i>			con municipal					Nitrato: 36 Nitrito: 82 Amonio: 99.9 Col. T.: 94 Col. Fecales 91	
SSFH	-	Akumal, Quinatan Roo	81.2	Doméstica	-	1.56	Grava	Tanque séptico	Materia orgánica: 68%	Whitney et al., 2003
SSFH	<i>Echinochloa crus-galli</i> <i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	Ocoyoacac, Estado de México	1.02	Acuacultura (trucha)	-	0.025	Grava	-	NAT: 30 NO ₂ -N: 22 NO ₃ -N: 56 PT: 23 SST: 60 DQO: 50	Rodríguez-González, 2013

Fuente: Elaboración propia

Nomenclatura: **SSFH:** Subsuperficial de Flujo Horizontal, **SSFV:** Subsuperficial de Flujo Vertical, **HF:** Humedal Flotante, **LM:** Laguna de Maduración, **SSFHP:** Subsuperficial de Flujo Horizontal de Pulimiento, **TS:** Tanque Séptico y **FL:** Flujo Libre.

En la tabla 1 se puede corroborar lo que señala Hernández (2013), en relación a que la mayoría de las investigaciones en HA se enfocan en cuestiones de tipo experimental. Sin embargo, estos estudios son la base para poder emprender un sistema biológico de tratamiento en un proyecto concreto. La importancia de estos estudios, radica en determinar el tipo de plantas que funcionan mejor en cada región de México, de acuerdo al tipo de agua, a los porcentajes de remoción y a otros datos relevantes cuando se plantea un HA en alguna región, comunidad, casa, escuela o sitio donde sea pertinente.

En este sentido, Zurita *et al.* (2012) identifica las barreras principales por las que los HA no han sido aceptados en México, a pesar que existe evidencia de numerosos estudios y casos de éxito alrededor del mundo. Estas barreras son por un lado la falta de conocimiento de los beneficios que generan los HA, lo cual se refleja en las empresas del sector que solo ofrecen métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, la falta de manuales de diseño y operación de HA, tanto para las autoridades como para usuarios directos, es una limitante para la implementación de estos sistemas, principalmente en zonas rurales, debido a que regularmente están escritos en inglés, lo cual dificulta su entendimiento.

Adicionalmente, en zonas rurales de México, hay desigualdad social y se carece de recursos económicos, por lo que es difícil que las familias o las comunidades de éstas zonas inviertan en el saneamiento de aguas grises. Esta situación es resultado de que las familias tienen prioridad en cubrir sus necesidades básicas de alimentación, salud, vivienda, servicios, entre otros.

2.4. Humedales artificiales con plantas ornamentales en México

El uso de plantas ornamentales en HA ha crecido en las últimas dos décadas alrededor del mundo, principalmente en zonas tropicales y subtropicales donde la variedad de plantas es amplia y existe escases de recursos económicos para la implementación de este tipo de tratamiento.

En México, la siembra de plantas ornamentales con valor comercial en HA representa un potencial para la generación de beneficios económicos adicionales para las comunidades rurales (Belmont y Metcalf, 2003; Zurita *et al.*, 2006; Konnerup *et al.*, 2009).

La estrategia de uso de plantas ornamentales en HA tiene la finalidad de que las comunidades rurales adopten el sistema de tratamiento con mayor facilidad, de tal forma que además de estar tratando sus aguas residuales, puedan obtener beneficios del mismo, por medio de la venta de plantas ornamentales en el mercado local. Adicionalmente, la calidad visual del paisaje puede mejorar considerablemente, aspecto que en muchas ocasiones es poco valorado, pero que tiene repercusiones psicosociales positivas en la vida diaria de las personas (Aliata y Silvestri, 2001).

De acuerdo con Hernández-Alarcón (2016), existen dos formas de utilizar plantas ornamentales en HA. La primera, se enfoca en que el sistema tenga una apariencia agradable al utilizar plantas acuáticas adaptadas a este medio que producen flores (hidrófitas) y la segunda, se enfoca en la siembra de plantas terrestres ornamentales tolerantes a condiciones de inundación, las cuales no necesariamente pertenecen de manera natural a ecosistemas de humedales y tienen un potencial económico. Cabe mencionar que es posible combinar ambas estrategias.

De acuerdo con (García-García, 2016), en México se han realizado varios experimentos con plantas ornamentales en HA, a nivel piloto en centros educativos, aunque también se cuenta con un par de casos de éxito utilizando especies de plantas ornamentales en comunidades rurales, los cuales se describen en el apartado 2.5.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los estudios realizados a nivel piloto sobre HA con plantas ornamentales en México. Algunos casos corresponden a comunidades o pequeñas localidades donde está ecotecnología se ha implementado para tratar de erradicar la descarga de aguas residuales en cuerpos de agua con la posibilidad de vender las plantas ornamentales producidas, para la

reutilización de agua para riego o acuacultura, así como para fines recreativos y estéticos.

Además, en la Tabla 2, se observa que existe una variedad considerable de plantas ornamentales en México que se pueden utilizar en HA, debido a las condiciones climáticas y de gran biodiversidad, lo cual brinda la posibilidad de seguir experimentando con nuevas especies ornamentales con diversos objetivos de remoción de contaminantes. Por otro lado, un aspecto importante es que la eficiencia de remoción es muy similar a las plantas usadas comúnmente en HA alrededor del mundo: *Scirpus sp.*, *Typha sp.* y *Phragmites sp.* (Vymazal, 2011), lo que sustenta el uso de estas especies ornamentales adaptadas a condiciones humedad.

Tabla 2. Humedales artificiales en México con plantas ornamentales.

Tipo de HA	Vegetación utilizada	Ubicación	Área (m ²)	Tipo de agua	TRH (días)	Flujo (m ³ /día)	Tipo de sustrato	Pretratamiento	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
*SSFH	<i>Typha domingensis</i> , <i>Cyperus papyrus</i> , <i>C. alternifolius</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Lilium sp.</i> , <i>Anthurium sp.</i> y <i>Hedychium coronarium</i>	Pinoltepec, Emiliano Zapata, Veracruz	60	Residual sedimentada	3	20	Tezontle	Directo	NT: 47 PT: 33 DQO: 67 ST: 34	Hernández-Alarcón, 2016
SSFH	<i>Canna hybrid</i> , <i>Alpinia purpurata</i> y <i>Hedychium coronarium</i>	Pastorías, Actopan, Veracruz	3.6	Doméstica rural	3	-	Roca de río	Directo	F: 35-45 Cl: 28-34	Marín-Muñiz et al., (s/f)
SSFH	<i>Canna hybrids</i> y <i>Strelitzia reginae</i>	Guadalajara, Jalisco	65	Doméstica	3	11	Tezontle	Filtro anaeróbico	DQO: 86 NT: 30-33 PT: 24-44	Merino-Solís et al., 2015

3 Híbridos	SSFH: <i>Zantedeschi a aethiopica</i> (6 meses) después <i>Canna</i> SSFV - SSFH <i>indica</i> (3 meses) SSFV: SSFH - SSFV <i>Strelitzia reginae.</i>	Ocotlán, Jalisco	LE: 0.49 FH: 0.48 FV: 0.23	Mezcla de aguas grises de cafetería y negras	3	0.2	Tezontle	Tanque sediment ador	Org-N: 47.9-83.1 NT: 56-20 DQO: 0-79.6 DBO: 60.5- 96.6 E. coli: 99.4-99.9 NH ₄ : 72-85	Zurita y White, 2014
Híbrido: SSFH - SSFV	<i>Zantedeschi a aethiopica</i> y <i>Heliconia Golden Torch</i>	Xalapa, Veracruz	0.38 para ambos	De río	3	-	SSFH: suelo SSFV: grava volcánica	Directo	DQO: 70 P-PO ₄ : 76 NO ₃ : 76	Galindo- Zetina, 2012
*SSFV	<i>Zantedeschi a aethiopica,</i> <i>Arundo donax</i> y <i>Medicago sativa</i>	CDMX	55	Mezcla de agua residual tratada, con agua residual doméstica y agrícola	1.58	4	Grava sílica	Directo y Tratamie nto posterior al humedal con filtro de pulimento	DQO: 92 N-NH ₄ : 85 P-PO ₄ : 80	Ramírez- Carrillo et al., 2009

SSFH	<i>Strelitzia reginae</i> , <i>Zantedeschia esthiopica</i> , <i>Canna hybrids</i> <i>Anthurium andreanum</i> , <i>Hemerocallis Dumortieri</i>	Ocotlán, Jalisco	0.06	Municipal	4	0.005	Tezontle	Tanque de sedimentación	DQO: >75 P: 66 Coliformes :>99	Zurita et al., 2006
*SSFV	<i>Saccharum spp</i> , <i>Panicum maximum</i> , <i>Vetiveria zizanooides</i> , <i>Heliconia psittacorum</i>	Tapachula, Chiapas	300	Mezcla de agua municipal con agua de lavado de beneficio de café	5.6	10	Grava y arena de mar	Sedimentos tipo Emscher y tanque amortiguador	DQO: 92 Coliformes : 95	Orozco et al., 2006
SSFH	<i>Heliconia stricta</i> , <i>Heliconia psittacorum</i> and <i>Alpinia purpurata</i>	Tapachula, Chiapas	27.5	Doméstica	1	-	Grava, arena y rocas de río	Digestor anaerobio	DBO: 35-48 DQO: 45-64 PT: 1.7-39 NT: 30-39	Méndez-Mendoza et al., 2015

SSFH	<i>Canna Indica</i>	Guadalajara, Jalisco	0.36	Agua con vinaza	3	-	Tezontle	Directo	DQO: 73 DBO: 88.3 TSS: 55 NT:55	López-Rivera et al., 2015
*Híbrido : SSFH - FS	<i>SS-FH:</i> <i>Phragmites australis,</i> <i>Equisetum hyemale</i> y <i>Cyperus papyrus</i> <i>FS:</i> <i>Schoenoplectus Californicus,</i> <i>Juncus effusus,</i> <i>Juncus acutus,</i> <i>Nymphae mexicana,</i> <i>Hydrocotyle ranunculoides,</i> <i>Polygonum amphibium,</i> <i>Sagittaria demersa,</i>	CDMX	Total: 8086 SSFH: 2351 FS: 5734	Efluente de un planta de tratamiento con lodos activados	-	250	-	Sistema con lodos activados	DBO: 79 SST: 84 NT:96 Coliformes : 99	Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014

Potamogeton pusillus,
Ceratophyllum demersum,
Wolffia Columbiana,
Lemna gibba

Híbrido: SSFH - SSFV	<i>Zantedeschia Aethiopica</i> y <i>Canna flaccida</i>	Texcoco, Estado de México	11.2	Doméstica	2.3	2.8	-	-	SST: 85.98 DQO: 85.83 NH ₄ -N: 65.46 NO ₃ -N: 81.7 NT: 72.62	Belmont et al., 2004
**SSFH	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Zona central de México	0.91	Municipal	2	0.04	Grava	Directo	DQO: 35 NT: 45.6 NPEO (nonil fenol etoxilado): 96.6 NP (nonil fenol): 54.1	Belmont y Metcalfe, 2003

*SSFH	<i>Zantedeschia aethiopica</i> y <i>Anemopsis californica</i>	Ocotlán, Jalisco	1	Subterránea contaminada con arsénico	5	-	-	Directo	-	Del Toro-Sánchez <i>et al.</i> , 2013
Híbrido SSFH-SSFV	<i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Strelitzia reginae</i> , <i>Anturium andreanum</i> <i>Agapanthus africanus</i>	Ocotlán, Jalisco	SS-FH: 6.48 SS-FV: 6.48	Municipal	4	SSFH: 0.118 SSFV: 0.128	Tezontle	Directo	DBO: 80 DQO: 80 Org-N: 50.6 NH ₄ : 72.2 PT: 50 CT: 96.9	Zurita <i>et al.</i> , 2009
3 Híbridos : SSFH - LE SSFH – SSFV SSFV-SSFH	<i>Zantedeschia aethiopica</i> <i>Strelitzia reginae</i>	Guadalajara, Jalisco	SSFH: 0.48 SSFV: 0.23 LE: 0.49	Mezcla de aguas grises, negras, y residuales de laboratorio	3	0.2	Tezontle	Directo	<i>E. Colli</i> : 99.93 CT: 99.99	Zurita <i>et al.</i> , 2015

*Híbrido	<i>Zantedeschia</i>	Tijuana, Baja California	SSFV: 15.66	Residual de centro educativo	-	-	Arena y grava	Tanque séptico y sedimentador	DBO: 70	Hallack-Alegría <i>et al.</i> , 2015
SSFV - SSFH	<i>Aethiopica australis</i>		SSVH: 19.2							
*Híbridos:	SSFH: <i>Zantedeschia</i>	Ocotlán, Jalisco	SSFH: 0.48	Residual de la Universidad y concentraciones inyectadas de carbamazepina	-	H1 y H2: 0.03	Tezontle	Directo	Remoción másica: H1: 60 H2: 55 H3: 37	Tejeda <i>et al.</i> , 2014
H1:	<i>aethiopica</i> ,		SSFV: 0.23			H3: 0.036				
SSFH - LE	<i>Iris sibirica</i> ,		LE: 0.48							
H2:	<i>Thypha latifolia</i>									
SSFH – SSFV										
H3:	SSFV: <i>Strelitzia reginae</i>									
SSFV – SSFH										
*SSFH	<i>Zantedeschia aethiopica</i> <i>Iris sibirica</i>	Guadalajara, Jalisco	1.53	Agua con arsénico	3	-	Tezontle	Directo	79 remoción arsénico	Zurita <i>et al.</i> , 2014

Fuente: Elaboración propia

Nomenclatura: **SSFH**: Subsuperficial de Flujo Horizontal, **SSFV**: Subsuperficial de Flujo Vertical, **FS**: Flujo Superficial y **LE**: Laguna de Estabilización

*Sistemas de humedales con especies ornamentales combinadas con especies no ornamentales

**El estudio se realizó en laboratorios de Canadá. Sin embargo, se trabajó con condiciones climáticas y tipo de agua residual para la Zona Central de México.

2.5. Humedales artificiales aplicados en el sector turístico en el mundo

A pesar de la limitada información respecto a la relación entre actividades de recreación y turismo con HA, existen algunos ejemplos a nivel internacional que permiten vislumbrar una asociación positiva entre estos dos elementos documentados en los siguientes casos de estudios.

En los trabajos de Brix *et al.* (2007) y Brix *et al.* (2011) en Tailandia, después del Tsunami ocurrido en 2004, donde a través de diferentes tipos de HA, se reinstaló un sistema de tratamiento de agua para una región con altos índices de turismo convencional de sol y playa. Los diseños de estos HA se caracterizan por tener un alto grado de calidad estética utilizando plantas ornamentales y otros elementos que además de tratar las aguas residuales, hacen de este sistema un lugar de interés turístico, científico y de recreación.

Otro ejemplo representativo del uso de HA para usos recreativos y educativos son los humedales ubicados en el *Parque de Investigación de Humedales del Río Olentangy*, en Ohio, Estados Unidos, donde se puede realizar avistamiento de aves, caminatas y eventos nocturnos, que son parte de las actividades del ecoturismo y a la vez funciona como un laboratorio vivo para realizar investigaciones en torno a la restauración ecológica de humedales (Mitsch, 2005; Mitsch, 2014; Mitsch *et al.*, 2014).

En un parque de Shanghái, China, una de las metrópolis más grandes y contaminadas del mundo, se usan HA para mejorar la calidad del agua de un río urbano que anteriormente estaba totalmente contaminado. En la actualidad, el río cuenta con estándares de calidad de agua que permiten la proliferación de fauna y flora característica del lugar (Xiaoping *et al.*, 2009).

La restauración del río, permitió la creación de un área verde de 86000 m², lo cual ha elevado la plusvalía de las residencias de la zona y también es un área para la educación ambiental. Este proyecto es una muestra del impacto que puede tener la utilización correcta de un HA, en cualquier lugar del planeta.

A nivel internacional, un lugar ideal para practicar turismo de naturaleza, principalmente avistamiento de aves, donde los HA funcionan como lugares de recreación, son los humedales de Brington en Canadá que abarcan un área de 6.2 hectáreas (Kadlec *et al.*, 2012).

En Costa Rica, la universidad EARTH, cuenta con varios HA que funcionan como módulos demostrativos de investigación y para actividades de recreación (Mitsch *et al.*, 2008) y una lista de más de 160 sistemas de tratamiento de agua con fines de recreación y educación (Ghermandi y Fitchman, 2015).

En Portugal, Calheiros *et al.* (2015), vincula los temas de turismo rural y de humedales artificiales. La propuesta fue utilizar un policultivo de plantas ornamentales con varios objetivos: aumentar la eficiencia de remoción de contaminantes por medio de policultivos y aumentar la calidad visual del establecimiento de turismo rural para los visitantes.

Además, las plantas ornamentales de estos HA pueden utilizarse para decorar las habitaciones, comedores y zonas de uso común del sitio, aunado a que la variedad de plantas cultivadas, permite fomentar la biodiversidad de la zona donde se encuentra establecido el sistema.

2.6. Humedales artificiales aplicados en el sector turístico en México

En México, existen cuatro casos documentados de HA donde se ha utilizado este sistema con fines recreativos o turísticos. El primero se encuentra en los lagos urbanos de la Ciudad de Xalapa, Veracruz, los cuales presentaban eutrofización alta². Esta zona es un punto de reunión tradicional de los habitantes de la ciudad,

² Proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas. Sus efectos pueden interferir de modo importante con los distintos usos que el hombre puede hacer de los recursos acuáticos (abastecimiento de agua potable, riego, recreación, etc.) (Margalef, 1991)

donde es posible realizar caminatas, tirolesa y remar en los lagos (Olguín *et al.* 2014)

De acuerdo con los resultados del trabajo realizado por los investigadores arriba citados, aun se requiere extender la investigación para confirmar la efectividad del sistema de HA flotantes con plantas nativas de humedales naturales. Sin embargo, dentro de los resultados encontrados se ha observado una mejora considerable en la remoción de nutrientes y patógenos durante el verano y otoño principalmente, lo cual permite el uso de los lagos para fines recreativos.

El segundo caso se ubica la Ciudad de México (CDMX), específicamente en el Lago del Bosque de Aragón, al oriente de la ciudad. Este HA mide aproximadamente una hectárea, se encuentra en una superficie de 12 hectáreas y permite el tratamiento de las aguas provenientes de una planta de tratamiento de lodos activados en donde se usan algunas plantas ornamentales con fines estéticos recreativos (Luna-Pabello y Aburto-Casteñeda, 2014).

El sistema de tratamiento de la CDMX se compone de dos tipos de HA, uno de flujo superficial continuando su cauce a uno de flujo libre, que en conjunto han reducido la carga de contaminantes en 80%, lo cual representa una calidad de agua tratada superior a la establecida por la normatividad para cuerpos acuáticos con fines recreativos (*ibíd.*). Cabe mencionar que en este HA, se usan algunas plantas ornamentales con fines estéticos.

De acuerdo con Whitney *et al.* (2003), el tercer sistema de HA en México fue implementado en un Centro de Educación Ambiental con vocación turística, el Centro Ecológico Akumal (CEA), en Quintana Roo. Esta Asociación realizó algunos esfuerzos por promocionar el uso de estos sistemas por medio del turismo educativo y otros proyectos en comunidades aledañas.

No obstante, la falta de un diseño a largo plazo y la poca participación de los habitantes de comunidades aledañas no han permitido que el proyecto tenga avances considerables, aunado a que el CEA, actualmente se encuentra en el

escrutinio social, debido que los habitantes de la localidad no tienen acceso a la zona de playa donde está ubicado el Centro Ecológico (Águila-Arreola, 2017).

El cuarto sistema de HA en México se ubica en el Ejido Julián Villagrán del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo. Este trabajo inició desde 1995 con la implementación de un HA de 50 m² para tratar las aguas grises de la comunidad con apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la organización no gubernamental, Servicios de Apoyo para el Desarrollo A. C. (SEDAC), utilizando una especie ornamental con valor comercial, el alcatraz (*Zantedeschia sp.*). El proyecto está a cargo de 16 miembros de la etnia Otomí hñahñu de la región, quienes integran una sociedad cooperativa denominada “La Coralilla” (García-García *et al.*, 2016).

Al inicio del proyecto las mujeres de la cooperativa vendían los alcatraces en arreglos florales y el agua se reutilizaba para el riego de hortalizas. Posteriormente el HA se expandió de 50 m² a 400m² y la cooperativa decidió producir tilapia (*Oreochromis sp.*), para la venta en un restaurante que también pertenece a la cooperativa. En la actualidad, el proyecto cuenta con actividades de remo y pesca en una laguna artificial. La calidad del agua está certificada para la producción de peces por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA).

La Sociedad Cooperativa La Coralilla, es una iniciativa ejemplar a nivel internacional en el manejo eficiente de los recursos naturales, el cual está a cargo de pueblos originarios, en combinación con el sector académico y organizaciones de la sociedad civil. Es digno de resaltar este proyecto como un nicho de oportunidad de desarrollo comunitario en todas las esferas de la sustentabilidad.

Por último, en 2013 se puede mencionar la estrategia en el municipio de Pinoltepec, Veracruz donde se parte de una visión de participación comunitaria para el manejo de un HA de flujo subsuperficial de 60 m² para tratar las aguas residuales de la zona, por medio de la utilización de plantas de ornato con un nicho de mercado

definido, en combinación con plantas típicas de humedales naturales (Hernández, 2016).

El grupo que cuida este HA, está conformado por cinco mujeres que le dan mantenimiento y al mismo tiempo producen alcatraces, anturios y azucenas. Estas plantas ornamentales son vendidas una vez que alcanzan el tamaño comercial necesario. Además, reutilizan el agua del efluente del HA para el riego de un vivero de violetas que también se incluyó en el proyecto.

Con la estrategia de incorporar plantas ornamentales se incrementan las posibilidades del mantenimiento de un HA a largo plazo en una comunidad rural, debido al beneficio económico que genera la venta de plantas de ornato y tal vez por la cohesión social que implica el trabajo comunitario y equitativo. Por ende, este método constituye una opción tangible por la adopción de sistemas de tratamiento de bajo costo y eficientes como lo son los HA en otras regiones del país.

2.7. Tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales en proyectos ecoturísticos de la Zona Centro de Veracruz

Existe un limitado número de proyectos ecoturísticos que ofrecen servicios dentro del turismo de naturaleza que cuentan con sistemas de tratamientos con HA para tratar las aguas residuales generadas en esta actividad y la Zona Centro de Veracruz no es la excepción.

Una de las razones del limitado uso de sistemas de tratamiento con HA, puede ser que los propietarios de centros ecoturísticos desconozcan la norma NMX-AA-133-SCFI-2013³ que certifica el desempeño sustentable y buenas prácticas ambientales

³ La norma tiene como objetivo establecer los requisitos y especificaciones de desempeño ambiental en el ecoturismo, así como establecer el procedimiento de evaluación de la conformidad para efectos de certificación. Los requisitos y especificaciones de la norma orientan la asignación y ejecución de apoyos públicos y privados, en materia de ecoturismo.

Esta norma es de cumplimiento voluntario y aplica a personas físicas o morales e interesados en el desempeño sustentable y buenas prácticas ambientales en el ecoturismo en el territorio nacional (SEMARNAT, 2012).

en las ramas del turismo de naturaleza, denominado exclusivamente para esta norma como ecoturismo, donde es un requisito el manejo de las aguas residuales.

Por otro lado, es probable que el desconocimiento sobre la ecotecnología de HA y la falta de recursos económicos para la construcción de este sistema de tratamiento de aguas grises, limita su implementación, siendo que esta puede generar un valor agregado de reconocimiento social, ingresos económicos y beneficios ambientales.

Cabe mencionar, que en Veracruz y en otras regiones de México existen otras ecotecnologías que pueden erradicar la contaminación de cuerpos de agua como los baños secos y los biodigestores (Ortiz-Moreno *et al.*, 2014). En este sentido, en la Tabla 3 se enlistan los métodos de tratamiento de aguas residuales en centros ecoturísticos de la zona centro de Veracruz.

Como se observa en la Tabla 3, de los doce centros ecoturísticos de referencia, solo tres cuentan con ecotecnologías para el tratamiento de aguas residuales; el Centro Ecoturístico Tenochtitlán utiliza baños secos en sus habitaciones para hospedaje; el Jardín de la Salud utiliza un biodigestor para tratar aguas grises y negras resultantes principalmente del restaurante y el Centro Ecoturístico Playa la Junta es el único proyecto que utiliza un HA artificial para el tratamiento de las aguas grises del restaurante y del lavado de ropa.

Con excepción de Rancho San Fermín, donde el objetivo es reutilizar las aguas grises sin tratamiento en cultivos de caña, ninguno de los 12 centros ecoturísticos descargan las aguas residuales de manera directa en el ambiente; algunos tienen un sistema de drenaje y otros cuentan fosas sépticas. No obstante, el contar con estos sistemas no garantiza que las aguas generadas por la actividad turística no tengan como destino los cuerpos de agua o los mantos freáticos.

Por ello, es indispensable que los propietarios de los 12 centros ecoturísticos de referencia, dedicados a la promoción del cuidado de los recursos naturales por medio de diversas actividades del turismo de naturaleza, inviertan en tecnologías limpias, en congruencia con su misión y visión como empresas sustentables que

dependen enteramente de la calidad de los espacios naturales, y en especial en el cuidado del agua, pilar fundamental de los ecosistemas.

A continuación, se enlistan 12 centros ecoturísticos más conocidos de la de la Zona Centro de Veracruz y el manejo de sus aguas residuales.

Tabla 3. Manejo de las aguas residuales en proyectos de Turismo de Naturaleza ubicados en la zona Centro de Veracruz

Centro ecoturístico	Ubicación	Tipo de turismo de naturaleza	Antigüedad	Cuenta con sistema de tratamiento de aguas residuales	Cercanía a cuerpo de agua
1. Centro Agroecoturístico Playa la Junta	Ojo de Agua Grande, Amatlán de los Reyes	Turismo de aventura, turismo rural y ecoturismo.	16 años	Humedal Artificial	Río Atoyac
2. Rancho San Fermín	Potrero Viejo, Atoyac	Ecoturismo, Turismo rural	8 años	Las aguas grises son vertidas sin tratamiento al cultivo de caña	Cuenta con lagunas artificiales
3. Finca Santa Martha Ecosuites	Los Reyes, Zongolica	Turismo de aventura, Ecoturismo	1 año	Sin tratamiento al drenaje	---
4. Villas Pico de Orizaba	La Perla	Turismo de aventura y ecoturismo	12 años	Fosa séptica	Escurrimientos del Pico de Orizaba
5. Chula Vista Camping	Fortín	Turismo de aventura y ecoturismo	12 años	Sin tratamiento, se vierten al drenaje	Río Metlac
6. La Compañía de Jesús	Zongolica	Ecoturismo	4 años	Sin tratamiento, directo al drenaje	---

7. Restaurant Ecoturístico La 88	Zongolica	Ecoturismo	12 años	Fosa séptica	---
8. El Jardín de la Salud	Fortín	Ecoturismo	20 años	Biodigestor	Río Metlac
9. Ecoturístico Tepexilotla	Tepexilotla, Chocamán	Rural y ecoturismo	12 años	Fosa séptica	Río Metlac
10. Centro Agroecoturístico de Investigación San Juan de la Punta	Cuitláhuac	Ecoturismo	6 años	Fosa séptica	Cuenta con lagunas artificiales
11. Centro ecoturístico Tenochtitlán	Ojo de Agua Grande, Amatlán	Ecoturismo	5 años	Fosa séptica y baños secos	Nacimiento del río Atoyac
12. UMA Estación Ambiental Tequecholapa	El Naranjal	Ecoturismo	5 años	Fosa séptica	Río Tequecholapa

Fuente: Elaboración propia con datos de los centros ecoturísticos de la Zona Centro de Veracruz.

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1. Turismo en la zona rural

El turismo que se desarrolla en zonas rurales es relevante como actividad complementaria de ingreso a las familias y tiene un gran potencial de desarrollo en México, vasto en recursos naturales y con una enorme diversidad cultural, que en conjunto son parte del atractivo de esta actividad (Barrera, 2006).

De esta manera, los habitantes de las zonas rurales a través del turismo rural pueden ser partícipes activos en el cuidado del medio ambiente y en el desarrollo socioeconómico, cultural y político de su comunidad. Para lograr esto, es necesario que exista un vínculo directo entre los visitantes y las familias que ofrecen el servicio de turismo rural en las comunidades, para que la comunidad se beneficie de manera directa (Lopez-Palomeque, 2001 y Quinteros-Santos, 2004).

Existen diversas modalidades del turismo que se desarrolla en zonas rurales. Dependiendo del contexto, es posible clasificar el turismo que se realiza en cada país o regiones continentales, como lo es la Unión Europea o los países Latinoamericanos (Vera-Rebolledo *et al.*, 2013).

La Secretaría de Turismo de México (SECTUR), con el fin de facilitar la planeación y desarrollo de productos turísticos que atienda las exigencias, gustos y preferencias de quién demanda en el mercado turístico este tipo de servicios, ha buscado estandarizar y unificar criterios bajo el concepto del “Turismo de Naturaleza”, el cual consta de tres grandes segmentos: Ecoturismo, Turismo de Aventura y Turismo Rural (SECTUR, 2006). En la Figura 4 se especifican las características de cada tipo de turismo.

Es importante mencionar que para fines prácticos de este trabajo, se usa como referencia al turismo de naturaleza, debido a que en el centro ecoturístico Playa La Junta se desarrollan actividades de los tres segmentos de este tipo de turismo de acuerdo con la clasificación oficial.

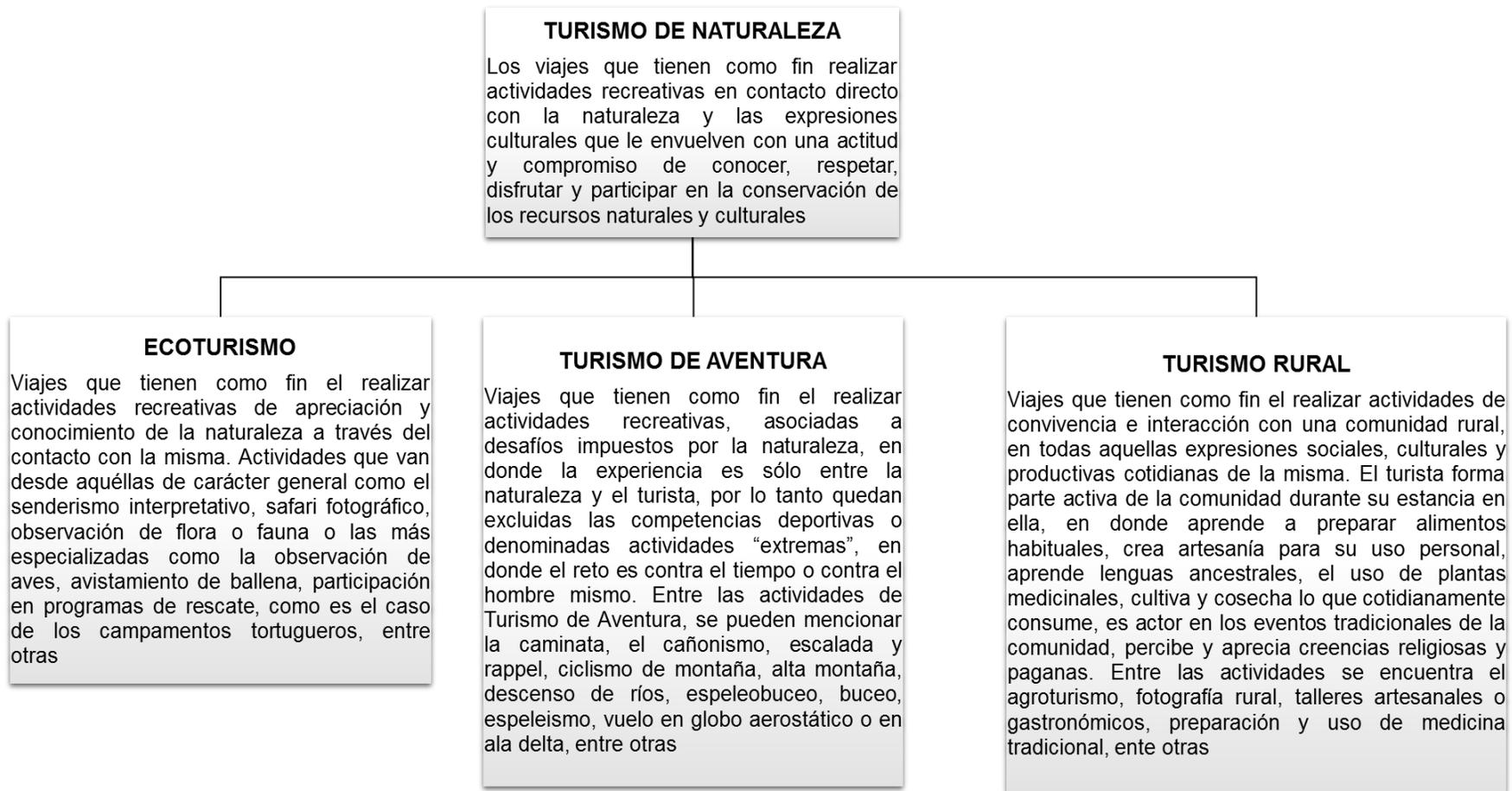


Figura 4. Características de los diferentes segmentos del turismo de naturaleza.

Fuente: Modificada de SECTUR (2006).

3.2. El patrimonio: base del turismo de naturaleza

De acuerdo con Quintero-Santos (2004), el turismo de naturaleza se encuentra en el marco de la sostenibilidad, donde un proyecto sostenible deben cumplir con cuatro características: 1) Que sea *biológicamente aceptado*, acorde entorno ecológico de la zona; 2) *Económicamente viable* y que contribuya a la rentabilidad financiera de la empresa que lo promueve; 3) *Socialmente incluyente* de los actores involucrados y 4) *Culturalmente sostenible*.

De acuerdo con lo anterior, el turismo de naturaleza depende de la calidad ambiental para su desarrollo, combinado con la interacción, organización y una buena administración por parte de los operadores turísticos⁴, aunado al manejo responsable de la puesta en valor de los aspectos culturales expresados en tradiciones y costumbres como parte fundamental del atractivo (Pastor-Alfonso, 2003).

Existen dos cualidades inherentes en el turismo de naturaleza: 1) El patrimonio natural y 2) El patrimonio cultural. Ambos patrimonios se rigen por las cualidades específicas de cada región y permiten la diferenciación entre éstas, debido a la alta diversidad biocultural que se puede presentar en ellas (Boege, 2008).

La Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural de la UNESCO de 1972 define el patrimonio en su sentido más amplio como, “*El territorio que ocupa un país, su flora, fauna y todas las creaciones y expresiones de las personas que lo han habitado: sus instituciones sociales, legales y religiosas; su lenguaje y su cultura material desde las épocas históricas más antiguas*” (UNESCO, 2016).

Independientemente del punto de vista turístico o económico que pueden tener el patrimonio cultural y natural, son espacios y expresiones que por su representatividad e importancia histórica, social, cultural y ambiental, requieren

⁴ Los cuales pueden ser las mismas comunidades rurales, empresas privadas o iniciativas del sector gubernamental

acciones de conservación. , principalmente en países megadiversos como México, en términos biológicos y culturales, con una población rural e indígena considerable; acervos vivos de la evolución humana y del manejo del entorno natural (Morán, 1997).

Al respecto, Boege (2008) menciona que los pueblos indígenas y las comunidades rurales en México, han sido reconocidos como sujetos sociales centrales para la conservación y el desarrollo sustentable en el artículo 8-j del Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB) de la ONU, donde México participa.

El artículo también señala que cada uno de los países participantes en el CDB tienen obligatoriamente que integrar en su legislación nacional el respeto, la preservación del conocimiento, las innovaciones y prácticas, y los estilos de vida relevantes para la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad (Oviedo *et al.*, 2000).

El turismo de naturaleza puede ser una de las pocas actividades económicas a escala global que cumpla con los requisitos íntegros de la sostenibilidad, así como con parte de los objetivos de convenios internacionales de gran relevancia como lo es el CBD, renovando el valor del conocimiento de las comunidades rurales en el manejo correcto de los recursos naturales y en la preservación del patrimonio cultural Quintero-Santos (2004).

De esta manera es posible contextualizar los objetivos del turismo de naturaleza social y ambientalmente responsable, como elemento complementario de la integración del patrimonio, por medio de la valorización, el respeto y el desarrollo conjunto de las culturas y de los recursos naturales (SECTUR, 2007).

El patrimonio natural y cultural que tienen las comunidades rurales es único, no sustituible, ni objeto de importación. Con lo que actualmente se tiene en espacios rurales en donde hay potencial para el turismo de naturaleza, es con lo que se debe repensar el desarrollo integral de las sociedades modernas. De acuerdo con Toledo

(2006), uno de los factores que unifica todos estos procesos, es el agua, componente vital de bienestar social y ecológico

3.3. El agua como pilar del patrimonio

El agua, al ser el elemento base que sustenta la vida sobre la tierra, presenta diversas interpretaciones que van desde la perspectiva de las ciencias ambientales, hasta ser considerada un factor social clave para el desarrollo de las naciones, entre muchas otras formas e intentos de comprender el complejo entramado de interacciones socioambientales que la rodea (Carabias *et al.*, 2005).

Lo que es un hecho irrefutable, consenso mundial y un concepto prácticamente preconcebido, es que sin agua la vida como la conocemos simplemente no existiría (Lozan *et al.*, 2007). En este sentido, los seres humanos no alcanzamos a inferir que los ríos y sus cuencas de drenaje, entendidos como paisajes fluviales (Steinhardt y Volk, 2002), son integradores de los paisajes terrestres y albergan una porción considerable de la diversidad cultural de las civilizaciones del mundo a lo largo de la historia humana (Toledo, 2006).

El mismo autor, indica que como resultado de la cualidad multifuncional que tiene el agua, dentro de los paisajes fluviales existen flujos energéticos inmersos en la dinámica del ciclo del agua, los cuales determinan la vida en la tierra. Así, el agua cumple funciones vitales en la naturaleza y en la sociedad humana como medio de vida, como sistema de transporte de energía, de materias orgánicas y minerales, como factor productivo de biomasa y alimentos, como integrador cultural, como factor determinante de calidad de vida y en general como el pilar insustituible del patrimonio natural (*ibíd.*).

Las funciones naturales y sociales del agua dependen del buen funcionamiento de su ciclo, regulador por excelencia de procesos biofísicos, así como de las funciones ecológicas de los ecosistemas, por medio de sus relaciones físicas, biológicas y químicas (Ripl, 1995). De acuerdo con Toledo (2006), el trabajo físico se realiza a través de la interacción entre la evaporación, la condensación y el escurrimiento; la parte química, a través de la interacción entre la fragmentación del sustrato rocoso

y la disolución de rocas y minerales; y por último, la parte biológica se realiza a través de la fotosíntesis y de la transpiración.

De esta manera, el ciclo hidrológico es el único proceso natural en la tierra que logra unir los grandes sistemas energéticos presentes en ecosistemas terrestres, acuáticos, así como los componentes abióticos de la atmosfera (Boorstein y Renneburg, 2013). Todo esto a través de la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía, que en conjunto generan un equilibrio en el flujo energético y climático global que permite el desarrollo de todos los seres vivos y la dinámica ecosistémica que mantiene la vida en el planeta (Hartmann, 2016).

Por otro lado, el agua tiene una cualidad ambivalente, ya que al mismo tiempo es un elemento, un flujo, un medio de transporte, una sustancia que sostiene la vida y una fuerza que amenaza la misma, es sujeto así como objeto y, con frecuencia, es utilizada por los mismos medios para actividades sociales y culturales (Hahn *et al.*, 2012). Por todo esto, el agua inspira nuevas maneras de pensar sobre aspectos clave de las relaciones sociales, incluyendo el intercambio, la circulación, el poder, la comunidad y el conocimiento que se generan alrededor del vital líquido (Krause y Strang, 2016).

Hoy en día el agua permea todas las esferas sociales y culturales, aunado inminentemente a los procesos políticos. Por ende, autores como Bijker (2012), recomiendan estudiar a las sociedades humanas como “culturas del agua” o autores como Hastrup (2009), Orlove y Caton (2010) y Barnes y Alatout (2012), incluso describen los espacios donde las sociedades conviven como “mundos de agua”.

Aunado a estas innovadoras formas de entender los procesos sociales y su interacción con el agua, cabe la posibilidad de ir más allá de los límites conceptuales referentes a los enfoques convencionales en el tema. Ejemplo de esto es lo propuesto por Linton y Budds (2014), los cuales argumentan que el modelo clásico del ciclo hidrológico simplifica las realidades más complejas de la circulación del agua y es en sí mismo una construcción ideológica carente del factor humano.

Dichos autores proponen el "ciclo hidrosocial" como una alternativa conceptual, poniendo en primer plano la participación omnipresente de las actividades humanas en conflicto en la circulación del agua. Así, es posible comprender que lo social y lo ecológico no se encuentran en esferas distintas, sino que son parte de un campo multifacético continuo. De esta forma, pensar las relaciones a través del agua, ayuda a navegar por esta área y articular sus dimensiones políticas y éticas (Krause y Strang, 2016).

Por lo tanto, la investigación del agua dentro del contexto socioambiental y del concepto de paisaje es de enorme relevancia, debido a que los flujos de agua, materia y energía son inminentes para mantener las funciones ecológicas que dan soporte tanto a los ecosistemas como a la sociedad a través de los servicios ecosistémicos, y los componentes que dan estructura a los paisajes culturales (representaciones de la interacción del hombre con la naturaleza y expresión del patrimonio biocultural) están relacionados con estos flujos (Toledo, 2006).

3.4. Servicios que brinda el agua a la sociedad

Los ecosistemas, especies y genes; expresiones de la biodiversidad en todos sus niveles, son los principales abastecedores de bienes y servicios para la sociedad. Estos se traducen en productos y beneficios provenientes de los ecosistemas por medio de los servicios ambientales o servicios ecosistémicos (SE) (Groot *et al.*, 2002). Boyd y Banzhaf (2007) definen los SE como "*los componentes de la naturaleza disfrutados directamente, consumidos o utilizados para generar bienestar humano*". De acuerdo con la Evaluación de Ecosistema del Milenio, por sus siglas en inglés (MA, *Millenium Ecosystem Assesment*(2005), Los ecosistemas proveen cuatro tipos de servicios:

a) Servicios de aprovisionamiento: alimentos, agua y materias que subyacen a toda la vida en la Tierra. Estos son los servicios que más fácilmente se comprenden y los que más se valoran, debido a que la gran mayoría tiene un precio de mercado.

b) Servicios de regulación: filtración y purificación del agua, protección contra tormentas (islas que funcionan como barreras, humedales y corales), polinización, control de la erosión y captura de carbono. Si bien se está aprendiendo cada vez más sobre estos servicios, aún existe un gran desconocimiento sobre éstos y a su gran valor económico.

c) Servicios culturales: Las posibilidades de recreación y el turismo en los ecosistemas son los servicios culturales más conocidos. Sin embargo, son igual de importantes los valores espirituales y estéticos que muchas sociedades encuentran en la naturaleza. Aunado a que las grandes civilizaciones humanas antiguas, estaban asociadas a cuerpos de agua.

d) Servicios de soporte: la formación de suelos, fotosíntesis, el ciclo de los nutrientes y el agua. Estos servicios pueden ser considerados como los de mayor relevancia, ya que son la base para todos los demás servicios mencionados, son los que soportan el funcionamiento de todos los ecosistemas. No obstante, pasan desapercibidos debido a que la gran mayoría son intangibles para la sociedad y no se identifica un valor en el mercado.

En esta clasificación, se puede observar que dentro de las cuatro categorías de SE, se presentan diversos servicios relacionados con el agua. Por esta razón y debido a la enorme importancia que tiene el agua en todos los ámbitos, existe una clasificación aparte para denominarlos: *Servicios Ecosistémicos Hidrológicos* (SEH), de los cuales destacan la recarga de acuíferos, mantenimiento de la calidad de agua, reducción de sedimentos cuenca abajo, conservación de manantiales, reducción del riesgo de inundaciones y oportunidades de recreación y turismo (Perevochtchikova y Vásquez, 2012).

Como se puede observar en la Tabla 4, los SEH son parte fundamental del funcionamiento de los ecosistemas de las sociedades modernas. Estos se encuentran presentes en nuestra vida cotidiana como elemento fundamental para la preservación de la vida, en cuestiones religiosas, culturales y socioeconómicas como el turismo, una de las actividades más importantes a nivel mundial.

Tabla 4. Principales Servicios Ecosistémicos Hidrológicos del Agua Dulce.

Servicios de aprovisionamiento	Servicios de regulación	Servicios culturales	Servicios de soporte
Cantidad y calidad del agua: uso consuntivo: beber, uso doméstico, agricultura y uso industrial	Mantenimiento de la calidad del agua: filtración natural y tratamiento de agua	Recreación: canotaje, kayak y pesca deportiva	Rol en el ciclo de nutrientes: mantenimiento de la fertilidad de llanuras de inundación, producción primaria
Agua para uso no consuntivo: generación de energía, transporte y navegación	Amortiguador de inundaciones, control de erosión través del agua, interacciones con tierra e infraestructura de control de inundaciones	Turismo	relación presa/depredador y resiliencia de los ecosistemas
Organismo acuáticos para comida y medicinas		Valor de existencia: satisfacción personal por navegar libremente por un río y se vinculan valores espirituales y religiosos	

Fuente: Ecosystem and Human Well-Being: Policy Responses MA (2005).

La información contenida en la tabla 4 muestra la relevancia que tienen los SEH, ya que se encuentran en casi todos los procesos vitales de la Tierra. Sin embargo, de acuerdo con el informe de la MA (2005), dos tercios de los ecosistemas del mundo se encuentran amenazados, lo que afecta el buen funcionamiento de los SE, ya sea por la desaparición de hábitats o por la contaminación que prevalece en los ecosistemas, principalmente en los acuáticos, generadores de SEH.

3.5. La contaminación del agua y sus repercusiones al medio ambiente

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI o posiblemente el mayor de la historia moderna, es el de tener acceso suficiente a agua limpia (Schwarzenbach *et al.*, 2010), principalmente en países en vías de desarrollo en donde existe un enorme déficit en el abastecimiento de agua potable, con 748 millones de personas sin acceso a fuentes de agua limpia, así como en materia de saneamiento, con 2500 millones de personas sin instalaciones adecuadas para este fin (OMS, 2015).

En este sentido, Carabias *et al.* (2005) consideran que el agua se está convirtiendo en muchas regiones del mundo, en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, e incluso para la estabilidad social y política.

El detrimento de la calidad ambiental de gran parte de los ecosistemas terrestres y acuáticos se asocia a la contaminación de cuerpos de agua. De acuerdo con la Unión Europea (2012), los contaminantes más comunes del agua se clasifican en tres grande grupos:

a) Patógenos: incluyen bacterias, virus y otros gérmenes que causan enfermedades y se encuentran en las aguas residuales sin tratar o en los residuos animales de las granjas.

b) Productos químicos: productos orgánicos (detergentes, grasas, disolventes, herbicidas, productos petrolíferos, sustancias químicas utilizadas en los productos de higiene personal y cosméticos) e inorgánicos (vertidos industriales y subproductos, fertilizantes que contienen nitratos y fosfatos, metales pesados y sedimentos).

c) Basura y desechos visibles en el agua: Derivado de estos productos ajenos o sustancias con concentraciones mayores a las que pueden regular los ecosistemas acuáticos, en conjunto originan afectaciones sociales de gran

magnitud, principalmente en la salud humana, en regiones con niveles de marginación alta.

Aproximadamente 32% de la población mundial no cuenta con servicios básicos de saneamiento (OMS, 2015), aunado a que 80% de las aguas residuales del mundo son vertidas en ríos, mares y lagunas sin tratamiento alguno. En países en vías de desarrollo el problema se agrava de manera alarmante, ya que la cifra asciende a 90% (Corcoran *et al.*, 2010; UN-Water, 2015; WWAP, 2015).

Resultado de lo anterior, el agua contaminada causa 80% de las enfermedades en estas regiones del mundo; son la causa de muerte de 842 mil personas al año (Prüss-Ustün *et al.*, 2014). Así mismo, se estima que más de 340 mil niños menores de cinco años mueren anualmente por enfermedades diarreicas a consecuencia de un sistema ineficiente de saneamiento de agua, lo que equivale a casi 1000 niños al día (OMS, 2015).

Estudios como el de Hutton *et al.* (2007), han demostrado que invertir en infraestructura hidráulica en términos de disponibilidad y acceso de agua potable, así como al saneamiento, presentan tasas de retorno con grandes beneficios, son rentables tanto para inversores privados, como para los gobiernos y lo más importante, contribuyen a mejorar la calidad de vida de millones de seres humanos.

Los mismos autores mencionan que cualquier mejora de agua y saneamiento son rentables en todas las subregiones del mundo en desarrollo. En las regiones en desarrollo, el retorno de inversión de US\$1 se encuentra en el rango de US\$5 a US\$46, dependiendo de la intervención. Para las regiones menos desarrolladas, por cada dólar invertido para cumplir con los mínimos requerimientos de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la ONU en abastecimiento de agua y saneamiento, llevaría a obtener un retorno de al menos US\$5.

Es evidente que el enorme problema de la contaminación de los sistemas hídricos del mundo tiene soluciones, complejas, pero que podrían mejorar la calidad de vida de las personas que viven en países en vías de desarrollo. Por ello, de acuerdo con

la WWAP (2015), la crisis hídrica mundial es una crisis de gobernanza mucho más que de recursos disponibles y México es un claro ejemplo de esto, siendo un país con vastos recursos hídricos de todo tipo, pero con niveles de contaminación alarmantes y una distribución social de los bienes públicos totalmente desproporcionada.

3.6. Aguas residuales

Son las aguas provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de plantas de tratamiento y de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (CONAGUA, 2016).

La clasificación de las aguas residuales se genera a partir de su fuente de origen, sin embargo, la composición fisicoquímica y biológica de cada una varía y se refleja en el grado de contaminación o afectación ambiental (Deblonde et al., 2011)

Para el caso de estudio de Playa la Junta, se tomará como referencia las aguas grises provenientes del uso doméstico, donde se pueden incluir las de establecimientos comerciales o institucionales. Este tipo de agua contiene heces y orina humanas, así como agua proveniente del aseo personal, de la cocina o restaurante y de la limpieza de la casa.

Las Aguas Residuales Domésticas (ARD), suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas. Las ARD presentan características muy diferentes y se dividen en aguas negras y aguas grises, aunque en la gran mayoría de los casos se mezclan por razones prácticas en los drenajes.

3.6.1 Aguas negras

Son las aguas que se encuentran contaminadas por desechos orgánicos de humanos y de animales; las heces y la orina. La principal característica de este tipo de agua residual y la mayor preocupación para la sociedad, es que contienen

diversos organismos patógenos que pueden causar enfermedades e infecciones si no se realiza un tratamiento adecuado de éstas (OMS, 2015).

Los principales agentes infecciosos para el hombre y para los animales que pueden encontrarse en las aguas negras se clasifican en tres grandes grupos: 1) Las bacterias, 2) Los parásitos: protozoos y helmintos y 3) Los virus. Algunas de las enfermedades más conocidas son la salmonela, hepatitis, disentería, cólera, tifoidea, entre otras (EPA, 1999)

En la actualidad, las enfermedades descritas anteriormente cuentan con métodos de prevención y de tratamiento en todo el mundo, pero en países en vías de desarrollo, principalmente los de la región de África subsahariana representan un peligro continuo que ocasiona altos niveles de mortandad, sobre todo en niños menores de 5 años (OMS, 2015).

3.6.2. Aguas grises

Las aguas grises se definen como las aguas residuales urbanas generadas por la duchas, lavamanos, cocina, lavadoras y lavaderos (Jefferson *et al.*, 2004), éstas representan la mayor fuente potencial de ahorro de agua en las viviendas, ya que se estima que abarcan entre 50 y 80 por ciento del uso total de agua (Flowers, 2004) en un hogar.

De acuerdo con Niño-Rodríguez y Martínez-Medina (2013), las aguas grises se caracterizan porque al ser descargadas no presentan mal olor de manera inmediata. El dilema inicia cuando las aguas quedan estancadas, debido a que los microorganismos presentes en ellas utilizan rápidamente el oxígeno disponible, lo cual propicia mayor presencia de bacterias anaeróbicas, que además de generar malos olores, pueden crear un ambiente apto para el desarrollo de agentes patógenos humanos (Liu *et al.*, 2010).

Por otro lado, las aguas grises contienen altos contenidos de Fósforo, Potasio y Nitrógeno, aspecto que es propicio para la nutrición de diversos cultivos, pero en exceso en un cuerpo de agua, conduce al agotamiento del oxígeno, al aumento de

la turbidez, a la eutrofización y a la contaminación microbiana y química de los sistemas acuáticos (Morel y Diener, 2006). Esto puede afectar directamente las actividades económicas y los beneficios directos a la sociedad, como la pesca, la calidad paisajística, los bienes raíces, el turismo y la salud pública.

Las aguas grises también pueden afectar notablemente la composición y calidad del suelo. Esto sucede porque se tiene la falsa creencia de que las aguas grises al tener una gran cantidad de nutrientes pueden ser utilizadas sin tratamiento para riego de cultivos comestibles, error muy común en países en vías de desarrollo que pone en riesgo la salud de los consumidores, debido a que estas aguas pueden contener microorganismos dañinos para los seres humanos (Gross *et al.*, 2005)

En un sentido más estricto, la reutilización inadecuada de aguas grises tiene efectos perjudiciales en el suelo. Los sólidos suspendidos, los coloides y la descarga excesiva de surfactantes pueden obstruir los poros del suelo y cambiar las características hidro-químicas de los suelos. Usar aguas grises altas en contenidos de sodio para riego durante un largo período de tiempo, puede causar una salinización completa e irreversible de la capa superficial del suelo (Grattan, 2002).

Cualquiera que se la fuente o composición de las aguas residuales, el tratamiento de éstas, debe ser un objetivo a cumplir en todos los niveles sociales, así como en todas las actividades económicas que afectan la calidad del agua. Tal es el caso del turismo, el cual depende de estándares altos de calidad del agua en sus diversas modalidades. En especial el turismo de naturaleza, que por un lado busca la concientización y valoración de los recursos naturales y por otro se sustenta en el estado óptimo de los espacios naturales como principal atractivo, donde el agua junto con el suelo, son imprescindibles (SECTUR, 2007).

3.7. Manejo de aguas residuales en proyectos de turismo de naturaleza

Es un hecho que cualquier actividad económica puede alterar el entorno natural y la dinámica del mismo, pero los cambios realizados por el turismo de naturaleza

pueden tener mayor repercusión, debido a que esta actividad se realiza en regiones con un alto grado de conservación ambiental, alta calidad paisajística o en zonas patrimoniales de importancia nacional e internacional (Chavez-Dagostino y Andrade-Romo, 2012).

De acuerdo con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) en 2017, uno de los impactos negativos del turismo que más afecta los espacios naturales y patrimoniales, es la contaminación de los suelos y de los cuerpos de agua por emisiones líquidas, originadas en gran medida por la descarga de aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento.

En este contexto, Pérez-Ramírez *et al.* (2009) mencionan que las prácticas recreativas y el turismo intensivo en el medio rural, han generado un aprovechamiento irracional de los recursos, con el supuesto de la sustentabilidad y la generación impactos ambientales menores, donde las aguas residuales desempeñan un papel elemental.

En virtud de lo anterior, es necesario contar con indicadores de cambio en el medio ambiente que permitan evaluar los impactos negativos que genera el turismo en áreas susceptibles a cambios irreversibles, principalmente en su estructura ambiental, los cuales no han sido estudiadas lo suficiente como para poder proponer estrategias de desarrollo integrales (Ibáñez y Ángeles, 2012).

3.7.1. Aguas residuales e indicadores de sostenibilidad en turismo

Ibáñez y Ángeles (2012) indican que actualmente existen instituciones internacionales que plantean establecer lineamientos para el desarrollo de herramientas de medición de la sostenibilidad turística y de estándares de certificación de destinos y del desarrollo de espacios turísticos sostenibles. Sin embargo, la referencia estándar es la “*Guía Práctica de Indicadores de Desarrollo Sostenible para los Destinos Turísticos*” publicada por la Organización Mundial de Turismo (OMT) en 2005.

En este documento se enumeran diversos indicadores en donde las actividades turísticas tienen incidencia, y en donde el tema de las aguas residuales se considera como uno de los rubros. En términos generales, los indicadores para medir la sostenibilidad del manejo de aguas residuales son los siguientes:

- Porcentaje de la red de saneamiento del destino que recibe tratamiento.
- Porcentaje reutilizado de las aguas residuales tratadas (por ejemplo, para riego).
- Porcentaje de establecimientos (o alojamientos) turísticos conectados a sistemas de tratamiento de aguas adecuados.
- Número de casos de contaminación notificados al año (cada mes) por vertido de efluentes en corrientes y canalizaciones.
- Porcentaje del área de destino dotada de sistemas de recogida de aguas de tormenta.

Es importante mencionar que en los indicadores de sostenibilidad de la OMT para el manejo de aguas residuales, no se especifica el tipo de tratamiento que deben tener estas aguas. Por lo tanto, es necesario buscar un tipo de tratamiento que se adapte a las condiciones ambientales, socioeconómicas y culturales de la zona donde se desarrolle la actividad turística, considerando los proyectos enfocados al turismo de naturaleza.

3.7.2. Tratamiento de aguas residuales para la certificación mexicana de sustentabilidad en turismo

En el caso de México, se busca a través de la NMX-AA-133-SCFI-2013 certificar establecimientos o proyectos relacionados al turismo de naturaleza (en todas sus versiones) por el compromiso que éstos tienen dentro del marco del cumplimiento de los estándares de sustentabilidad propuestos por la OMT.

En específico, esta norma tiene como finalidad incentivar a los prestadores de servicios turísticos que cumplen con criterios óptimos de desempeño ambiental, mediante un certificado que constituya una ventaja competitiva en el mercado

turístico, elevando así su imagen ante turistas nacionales e internacionales, comunidades y organismos públicos y privados (SEMARNAT, 2012).

Dentro de estos requisitos y especificaciones se hace énfasis en el tratamiento de aguas residuales. Se menciona que es un requisito indispensable para las instalaciones del desarrollo turístico contar con un sistema de tratamiento de aguas residuales para evitar la descarga a cuerpos de agua, suelo o mantos freáticos.

En esta norma sí se hacen una serie de recomendaciones que indican diversas formas de tratamiento de agua residual. Una de ellas son los HA o como le llaman en la norma, *lechos de hidrófitas*, nombre poco común para este tipo de tratamiento.

A la fecha, un reducido número de proyectos enfocados al turismo de naturaleza en la región centro de Veracruz aplican lo establecido en la norma NMX-AA-133-SCFI-2013 como se muestra en la Tabla 3, lo cual implica que aún no pueden ser reconocidos como proyectos que cumplen con los estándares de sustentabilidad. Esto representa un área de oportunidad para hacer investigación en cómo pueden los centros ecoturísticos cumplir con ésta norma y cuáles son los beneficios que se derivan de su implementación.

CAPÍTULO IV. ESTUDIO DE CASO DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN SAN JOSÉ PASTORÍAS, ACTOPAN, VERACRUZ

4.1. Introducción

Los HA son una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de diversos sectores, en particular de las aguas grises del uso doméstico. Esta ecotecnología tiene un mayor potencial de uso en zonas rurales donde difícilmente se cuenta con sistemas de tratamiento de aguas grises ya que las familias cuentan con amplias extensiones de terreno que facilitan la implementación de esta ecotecnología.

En la localidad de San José Pastorías, perteneciente al municipio de Actopan en el estado de Veracruz, existe una iniciativa por utilizar HA para tratar las aguas residuales de los hogares, las cuales son dirigidas por un sistema de alcantarillado a un tanque receptor sin ningún tratamiento.

En este sentido, en 2015 se instaló un HA experimental en un hogar de la localidad, que adicionalmente ha funcionado para hacer una serie de experimentos con alumnos principalmente de la Universidad Veracruzana (UV) y del Colegio de Veracruz A.C. (COLVER), que en conjunto, permitirán obtener resultados concretos que faciliten la construcción de un HA para toda la comunidad, entre otros estudios de carácter científico.

4.2. Objetivos del proyecto

El proyecto de HA en la localidad de San José Pastorías, municipio de Actopan, Veracruz tiene varios objetivos particulares, entre los que destacan:

- a) Aprender el funcionamiento, mantenimiento, operación y diseño de un HA doméstico con plantas ornamentales.
- b) Obtener conocimientos teóricos acerca de biotecnologías sustentables para mejorar la calidad del ambiente, en particular de HA, por medio de sesiones semanales en el COLVER.

4.3. Ubicación de la zona de estudio

La localidad de Pastorías (Figura 10) cuenta con una población de 620 habitantes y presenta un grado de marginación Alto. Las actividades económicas preponderantes son agricultura y menor proporción ganadería (INEGI, 2010).

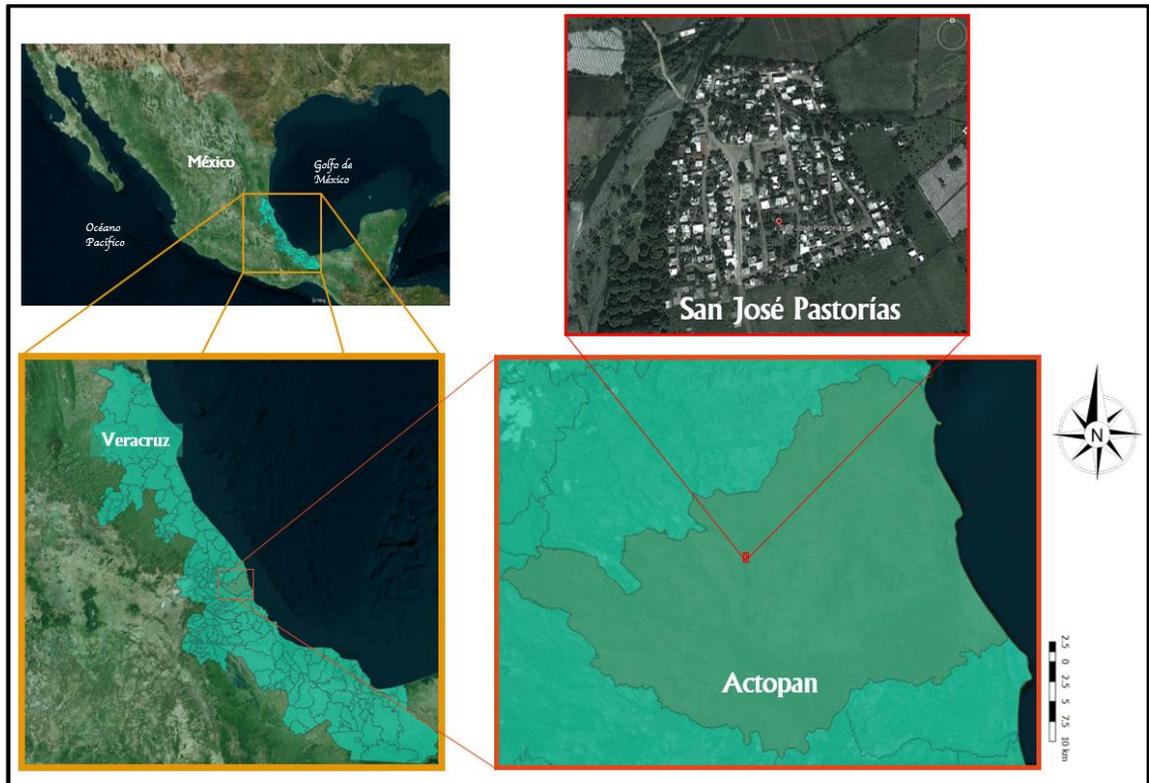


Figura 5. Ubicación de la localidad de San José Pastorías, Actopan, Veracruz.
Fuente: Elaboración propia con datos de Google.

4.4. Descripción del Humedal Artificial en San José Pastorías

El HA, es de tipo subsuperficial con flujo horizontal. Cuenta con 12 celdas experimentales, las cuales funcionan de manera independiente con la finalidad de probar diferentes sustratos y diferentes especies de plantas ornamentales. Tiene 8 celdas de 1.42m x 0.24m y 4 celdas de 1.56m x 0.22m, que en total suman un área de 4.09m². Cada celda contiene una combinación de dos sustratos: polietileno tereftalato (PET) y roca de río con cuatro especies de plantas ornamentales: *Alpinia purpurata*, *Zingiber spectabile*, *Strelitzia reginae* y *Zantadetchia aethiopica*, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de tres días.

4.5. Metodología de aprendizaje de Humedales Artificiales

Dentro de la estancia de vinculación en el COLVER se realizaron trabajos de restauración, siembra de plantas, colecta de sustrato de PET, medición de flujos, preparación de sustrato biológico para la plantación; así mismo, se adquirió un aprendizaje respecto al diseño, manejo y mantenimiento de HA. También se tuvo la oportunidad de participar en cursos y congresos y se hizo una exhaustiva revisión de literatura sobre HA, de la cual se obtuvieron una serie de datos en cuanto al estado del arte de los HA en México, resumidos en las Tablas 1 y 2 del Capítulo II.

A continuación se describen las actividades realizadas, las cuales permitieron sustentar la parte práctica de la implementación del HA en el proyecto de tratamiento de aguas grises que se desarrolló en el Centro Ecoturístico Playa la Junta que se describe en el Capítulo V.

4.5.1. Limpieza

El trabajo de limpieza, consistió en extraer el sustrato (tezontle y roca de río) que se encontraba en los HA de San José Pastorías, Actopan, Veracruz (Figura 11). Dicho sustrato fue utilizado por más de un año para tratar las aguas grises de una vivienda, así como para la realización de diversos experimentos científicos que sirvieron para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes de aguas grises domésticas con distintas plantas ornamentales y sustratos en condiciones diversas.

Este trabajo se realizó con la intención de realizar nuevas investigaciones en cuanto a la efectividad de los sustratos en sistemas de tratamiento de aguas residuales. En esta nueva etapa se usó como sustrato PET y roca de río. Cabe mencionar que la limpieza es un trabajo que requiere de un esfuerzo físico considerable. Por lo tanto, se observó que esta actividad se facilitaría si el diseño se modificara colocando una salida de agua y construir los humedales de menor altura.



Figura 6. Limpieza de HA localizado en Actopan, Veracruz.

4.5.2. Reparación de fugas

La reparación de fugas es un trabajo esencial en los humedales artificiales (Figura 12). Una vez al año es necesario revisar si existe alguna fuga de agua en el sistema, ya que al tratarse de agua residual, una filtración puede representar un problema de salud, así como una posible fuente de atracción de fauna nociva.

Las posibilidades de mejora en la revisión radican en usar cemento de buena calidad, posiblemente un impermeabilizante ecológico y que en la medida de lo posible la construcción del HA la realice un maestro albañil.

Por otro lado, en zonas rurales la utilización de materiales naturales es otra opción viable para evitar filtraciones en el suelo de manera sustentable. En este sentido, actualmente se realiza una investigación para elaborar un impermeabilizante que contiene ceniza, baba de nopal y estiércol de vaca, materiales comunes de bajo costo. En primera instancia, los resultados de la investigación parecen ser muy favorables para su uso en HA como base o piso de las celdas del sistema de tratamiento.



Figura 7. Reparación de fugas con cemento del HA ubicado en San José Pastorías Actopan, Veracruz.

4.5.3. Colecta de sustrato (PET)

Como se mencionó, los nuevos experimentos en el HA se hicieron con PET como sustrato. Este material se extrajo de botellas de bebidas comerciales, las cuales se cortaron de las partes con mayor rugosidad o espacios cóncavos (tapas, parte inferior y conjunto de pedazos apilados). Estas secciones son de gran utilidad para la fijación de microorganismos y para el establecimiento de las raíces de las plantas ornamentales.

Con la finalidad de reducir al mínimo el costo de construcción del HA se reutilizó PET, material altamente contaminante a nivel mundial. Se procedió a su recolección en diversos sitios en la comunidad de San José Pastorías para posteriormente cortarlo y usar algunas partes en los humedales.

Es importante resaltar que con antelación se realizaron algunos experimentos para identificar la adaptabilidad de las plantas ornamentales con este tipo de sustrato y se observó que funcionan correctamente, en cuanto al anclaje de las raíces en el residuo de PET.



Figura 8. PET como sustrato de plantas (izquierda.), colecta y recorte de PET (centro) y relleno de celdas del HA con PET recortado (derecho).

4.5.4. Siembra de plantas ornamentales

Una vez concluidos los trabajos de reparación y la colecta del sustrato, es posible sembrar las plantas que se van a utilizar para la remoción de contaminantes, resaltando que en este trabajo se utilizan únicamente plantas de ornato (Figura 14)

que se pueden adaptar a condiciones húmedas (anturio, alcatraz, ave de paraíso, maraca, entre otras).

Este tipo de plantas de ornato pueden generar un ingreso extra para las familias que construyen un HA en comunidades rurales, a través de su venta, también contribuyen a mejorar la calidad visual del paisaje, lo cual puede ser un incentivo para proyectos de turismo. Todo estos estos beneficios, sin sacrificar el objetivo principal del HA; la eficiencia de remoción de las aguas a tratar. Esto debido a que está científicamente comprobado que diversas especies de plantas ornamentales tienen el potencial de limpiar aguas residuales, casi con la misma eficacia que las plantas de ecosistemas de humedales naturales.



Figura 9. Siembra de anturios y otras especies ornamentales que permiten la remoción de contaminantes en los HA.

Es importante resaltar que en la parte superior del HA se coloca roca de río con la intención de que al momento de que el humedal comience a recibir el agua residual, el PET no flote y en consecuencia el agua se desborde con las plantas. Además, este tipo de roca presenta una porosidad y rugosidad óptima para la retención de microorganismos benéficos para la remoción de contaminantes del agua.

4.5.5. Preparación de sustrato biológico con estiércol de vaca

El sustrato biológico sirve en un inicio para favorecer el crecimiento de microorganismos en las raíces de las plantas y actúa como alimento para las mismas. Posteriormente el agua tratada servirá para el mismo fin. El sustrato consiste en una combinación de estiércol de vaca con agua, el cual se mezcla hasta llegar a diluirlo en el agua, para después verterlo en el HA (Figura 15, izquierda).



Figura 10. Vertido de sustrato biológico (izquierda) y medición de flujo para TRH (derecha).

4.5.6. Medición de flujos

La medición del flujo es parte esencial del funcionamiento del HA, ya que es necesario regular la cantidad de agua que se va a tratar en el sistema (Figura 15, der.). Para evaluar esto, se determina el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) a través de la siguiente fórmula:

$$TRH \text{ (días)} = V \text{ (m}^3\text{)} / Q \text{ (m}^3\text{/día)}$$

El TRH es el tiempo estimado que se desea que tarde el agua residual desde la entrada hasta la salida del sistema de tratamiento. En este caso, se determinó un

TRH de 3 días (es decir, el agua tratada que entre, estará fluyendo dentro del humedal durante tres días, contando desde el momento que entra, hasta que sale del sistema).

Para ajustar el TRH al tiempo requerido, se utilizaron reguladores de flujo intravenoso comúnmente usados en hospitales (Figura 15). No obstante, dependiendo de las características del HA, se usan otros instrumentos para la regulación del flujo, como una llave de paso conectada en la entrada del efluente.

4.5.7. Aprendizaje teórico de Humedales Artificiales

Aunado a las actividades prácticas realizadas en la localidad de Pastorías, se obtuvieron conocimientos teóricos de diversas alternativas ecológicas para el manejo y cuidado de los recursos naturales, por medio del curso "*Biotecnologías sustentables para mejorar la calidad del ambiente*" materia de la Maestría en Desarrollo Regional Sustentable impartida en COLVER, donde se hizo especial énfasis en la ecotecnología de HA.

Dentro del contexto del curso, se realizó una exhaustiva investigación bibliográfica sobre HA donde han utilizado plantas de sistemas naturales de humedales y en especial donde se utilizaron plantas ornamentales, debido a los beneficios adicionales que implica usar estas especies, las cuales se adaptan perfectamente a proyectos de turismo de naturaleza que se desarrollen dentro de una zona rural.

Parte de los resultados de mayor relevancia del trabajo de investigación realizado en el COLVER se presentan en las Tablas 1 y 2 del Capítulo II del presente documento. La primera parte es una recopilación de una serie de datos referentes al uso de plantas comunes de humedales naturales utilizadas en HA de México y la Tabla 2 presenta los mismos datos, pero con plantas ornamentales.

Ambas tablas, permitirán a investigadores y personas interesadas en el tema de HA, tener un panorama general de las plantas a utilizar en HA en México, así como comparar cuestiones elementales para el diseño del mismo, como tipos de sustratos, dimensiones, especies con mayor o menor eficiencia de remoción, TRH,

tipo de agua tratada, flujo, ubicación, sistemas de pretratamiento y sobre el tipo de HA usado. Esta información es de gran utilidad y contribuye al acervo científico de información sobre el manejo sustentable del agua en México.

Además, la información contenida en la Tabla 2, es una guía referencial para la implementación de plantas ornamentales en México que permite diversificar y extender los beneficios generados por los HA, principalmente en zonas rurales en donde existe potencial para la construcción de HA en proyectos de turismo de naturaleza.

4.6. Conclusión

Durante la estancia de vinculación en COLVER, con una duración de 6 meses, se adquirieron conocimientos teóricos y prácticos elementales que facilitaron la elección de la zona de estudio, el diseño y la construcción del HA en el Centro Ecoturístico Playa La Junta, en el Municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz. Aunado a la experiencia obtenida en cursos presenciales y la participación en congresos relacionados con el tema de HA permitió la aplicación de conocimientos adquiridos en el programa de maestría en Paisaje y Turismo Rural de manera concreta y tangible en el mundo real.

Por otro lado, se concluye que la importancia de los sistemas de tratamiento de agua con HA radica en que por un lado son ecológicamente más sustentables que los métodos tradicionales de remoción de contaminantes de agua. Adicionalmente, ésta ecotecnología es de bajo costo y más accesible para zonas rurales, en especial en sitios donde se practica turismo de naturaleza.

CAPÍTULO V. ESTUDIO DE CASO DEL CENTRO ECOTURÍSTICO PLAYA LA JUNTA

5.1. Ubicación del área de estudio

El Centro Ecoturístico Playa la Junta se ubica en la localidad de Ojo de Agua, en el municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz. Pertenecce a la Subcuenca de Atoyac dentro de la Cuenca del Río Jamapa de la Región Hidrológica del Papaloapan (INEGI, 2010).

La localidad cuenta con una población de 376 habitantes. La gran mayoría del territorio tiene vocación agrícola, principalmente cultivo de caña y en menor medida café y cítricos. Algunas familias se dedican como actividad complementaria de ingresos al turismo de naturaleza, principalmente las que tienen el cauce del Río Atoyac cerca de sus terrenos. Cabe resaltar, que dicha localidad presenta marginación alta según datos de INEGI (2010).

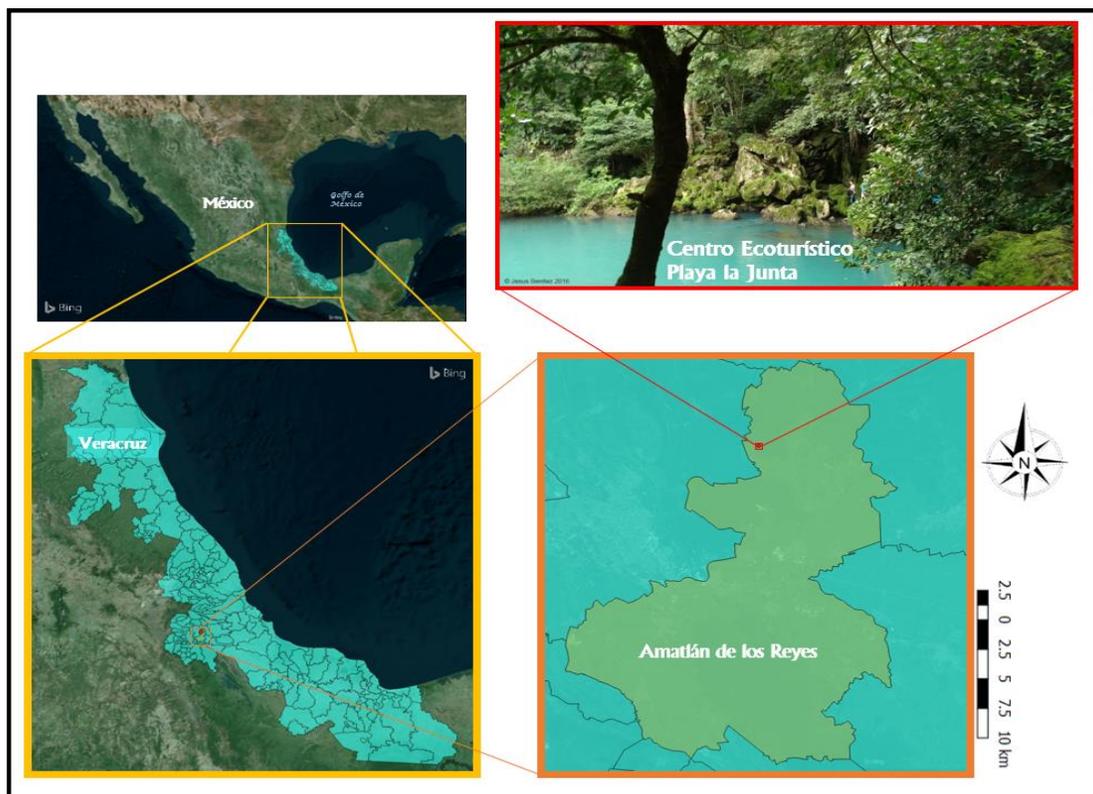


Figura 11. Ubicación del Centro Ecoturístico Playa La Junta, Ojo de Agua, Amatlán de los Reyes, Veracruz. Fuente: Elaboración propia con datos de Google.

5.2. Centro Ecoturístico Playa la Junta

El Centro Ecoturístico Playa la Junta inició operaciones turísticas en el año 2000. En primera instancia la idea fue concebida como un espacio donde la familia del propietario, se reunía los fines de semana para convivir en familia en un lugar agradable para todos y así compartir un espacio común para celebrar cumpleaños, bautizos y diversos eventos familiares.

Sin embargo, la visión del propietario, lo llevo a proyectar el terreno no solo como un espacio familiar, sino como un negocio turístico redituable, con el enfoque de la idea inicial: el de ser un lugar donde la convivencia en familia fuera el elemento clave que lo caracteriza.



Figura 12. Centro Ecoturístico Playa la Junta: zona de restaurante y eventos especiales (izquierda) y espacio para camping y recreación (derecha).

Es importante mencionar, que el espacio donde actualmente se ubica Playa la Junta, es un terreno con vocación agrícola, principalmente para el cultivo de caña, sin embargo con el paso del tiempo se ha ido modificando para ofrecer diversos servicios turísticos. Aspecto que muy pocas veces se observa en las zonas rurales; en donde el productor de caña o café, integre la parte turística y agrícola.

Otro de los atractivos de Playa la Junta es que se encuentra dentro del Área Natural Protegida “El Clarín, A.C.”, con una extensión de 630 hectáreas de tierras ejidales, administrada por una Asociación Civil integrada por ejidatarios y propietarios, en donde participa el propietario de este centro ecoturístico, quienes vigilan, controlan y norman la conservación del área (Agüero-Rodríguez y Tepetla-Montes, 2013).



Figura 13. Nacimiento del Río Atoyac, principal atractivo turístico de la región e ícono del ANP El Clarín (izquierda) en su recorrido el cauce de este río que pasa a un lado de Playa la Junta (derecha).

5.3. Servicios y actividades del Centro Ecoturístico Playa la Junta

Playa la Junta ofrece diversos servicios y actividades relacionadas al turismo de naturaleza: Turismo de aventura, Ecoturismo y Turismo Rural. Se realizan

actividades como el campismo y excursionismo, que incluye caminatas por el bosque, grutas y avistamiento de aves, *kayaking*, paseo en lancha, tirolesa, recorridos a caballo, así como el temazcal, guiado de manera tradicional en náhuatl por un maestro originario de la región (Figura 8.).



Por otro lado, es posible admirar y aprender acerca de la cría de mariposas en el mariposario a cielo abierto, sobre la meliponicultura y actualmente sobre el cuidado del agua con el HA. También se ofrece el servicio de alimentos, que se divide en comida típica con productos locales de la región (quelites, flor de izote, verdolaga, maíz, miel y café) y otros como los platillos de mojarras que provienen de dos estanques de cría con los que cuenta el proyecto ecoturístico



Figura 14. Mariposario abierto con plantas hospederas de mariposas (izquierda) y Temazcal localizado a un lado del río (derecha).

5.4. Vinculación con otros sectores

Además de que el proyecto ecoturístico de Playa la Junta pertenece a la Asociación Civil que vigila y norma el ANP “El Clarín”, también realiza vinculación académica

con instituciones que se ubican en su entorno como la Universidad Veracruzana (UV) y principalmente con el Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus Córdoba, con el cual se han realizado diversos proyectos que han fortalecido el proyecto, permitiendo al propietario y su familia una visión integral de desarrollo comunitario, orientado al cuidado del medio ambiente y a un aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.



Figura 15. Colaboración de Playa la Junta con el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba (izquierda) e impartición de diversos talleres de capacitación (derecha).

CAPITULO VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Etapa 1. Elección del sitio

La elección de sitio para la implementación del HA se realizó bajo los siguientes criterios:

- El centro ecoturístico debe estar en una zona rural.
- Reconocimiento del centro ecoturístico en cuanto al nivel de afluencia turística, traducida en mayor promoción de la ecotecnología
- Nivel de importancia turística de los cuerpos de agua cercanos



- Colaboración por parte del centro ecoturístico beneficiado (mano de obra, materiales, mantenimiento del HA y seguimiento del proyecto)
- Necesidad de saneamiento de aguas residuales
- Cuestiones físicas del terreno como pendiente y espacio disponible

6.2. Etapa 2. Diseño del Humedal Artificial

a) Variables para determinar los elementos del diseño del HA:

- Tipo de agua a tratar
- Volumen de agua residual diario
- Ubicación
- Tipo de suelo
- Destino del agua tratada
- Multifuncionalidad del sistema

b) Elementos del diseño del HA:

- Tipo de HA
- Dimensiones del sistema
- Tipos de plantas comunes o de ornato a utilizar
- Tipo de sustrato
- Diseño final

6.3. Etapa 3. Construcción del Humedal Artificial

Esta etapa consta del proceso de construcción del HA. Una vez que se conocen los elementos de diseño, se hace un plan de construcción del sistema de tratamiento de aguas residuales con el fin de optimizar los recursos y reducir costos, ya que en caso de no tener conocimientos de albañilería, será necesario contratar personal calificado. Además de contar con todos los materiales necesarios una vez comenzada la obra.

6.4. Etapa 4. Taller de diseño de humedales artificiales

Una vez realizado el diseño del HA, se organizó un taller de aprendizaje colectivo para la construcción de un HA en el Centro Ecoturístico Playa La Junta con actores clave localizados en la Microrregión de Atención Prioritaria (MAP) Zona Centro, que incluye líderes de emprendimientos turísticos, Unidades de Manejo Ambiental, asociaciones civiles e instituciones académicas de la región.

El taller tuvo como objetivo principal que los participantes aprendieran a construir un HA de manera sencilla, para que puedan replicarlo en sus hogares, proyectos o instituciones, así como para difundir la importancia sobre el cuidado y manejo de agua.

CAPÍTULO VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Elección del sitio

En primera instancia, se realizó una investigación de campo en centros ecoturísticos establecidos que tuvieran afluencia turística dentro de las MAP del Campus Córdoba, donde los propietarios pudieran estar interesados en técnicas de manejo de agua residual y que además presentaran características que permitieran el desarrollo del proyecto. Para ello, apoyado por la Subdirección de Vinculación y

de Educación del Campus Córdoba, se contactó con centros ecoturísticos de la zona centro de Veracruz que podían cumplir con los requerimientos necesarios.



Figura 16. Comunidad de Tepexilotla localizada en el Municipio de Chocamán, Veracruz en donde actualmente sus pobladores ofertan el turismo rural.

Los lugares fueron: la comunidad de Tepexilotla en Chocamán, la UMA Estación Ambiental Tequecholapa en Naranja, el Centro Ecoturístico Playa la Junta y el Centro Agroecoturístico e Investigación San Juan de la Punta en Cuitláhuac. Cabe señalar que también se tuvo acercamiento con habitantes de otras localidades interesados en el tema, pero al ser emprendimientos que apenas comienzan, no se consideraron, debido a la necesidad de encontrar un lugar consolidado para garantizar el seguimiento, la colaboración, así como la promoción del HA.

La evaluación del sitio se realizó por medio de entrevistas informales y visitas a los posibles lugares de implementación, tomando en cuenta las variables que se mencionaron en la sección anterior. Algunos aspectos como disposición de los encargados del lugar, por lo que fue necesario la intuición lógica para valorar si el sitio era apto con fines demostrativos y de educación ambiental.

Cabe mencionar que uno de los criterios más importantes, fue el de la relación que tienen los proyectos con sus cuerpos de agua, en el sentido de la dependencia de éstos como su mayor atractivo turístico. Esto debido a que el cuidado de sus ríos o

lagunas representan el sustento para sus familias, lo cual implica que tienen mayor interés en conservarlo.



Figura 17. Unidad de Manejo Ambiental (UMA) Tequecholapa localizada en la localidad de Tequecholapa del municipio de El Naranjal, Veracruz

Por otro lado, es importante resaltar que ninguno de los lugares visitados descarga aguas negras de manera clandestina. Sin excepción, todos cuentan con fosa séptica para tratar las aguas provenientes de los baños y la mayoría descarga sus aguas grises en canales improvisados a cielo abierto.

Por un lado, es una buena señal que no arrojen sus aguas negras al medio ambiente, pero también es una muestra de que se tiene poco conocimiento acerca de los efectos dañinos que provocan las aguas grises. Lo cual, desde otro punto de vista, se convirtió en un nicho de oportunidad para informar sobre los efectos de estas aguas, así como los beneficios que puede traer su reutilización.

El sitio que presentó las mejores condiciones para la construcción del HA fue el Centro Ecoturístico Playa la Junta. Por un lado, por ser el lugar que mayor prestigio, trayectoria y visitas tiene de los antes mencionados, lo cual genera que el sistema tenga mayor difusión y alcance a un sector más grande de la población.

En este sentido, Playa la Junta recibe visitantes de varias regiones del país, así como extranjeros. Además está fuertemente vinculado con instituciones educativas como la Universidad Autónoma de Morelos, la Universidad Nacional Autónoma de México, la UV y el COLPOS, así como con el sindicato de maestros de la región, los cuales organizan anualmente un evento de retiro. Todos estos vínculos son de gran importancia para la difusión de esta ecotecnología.



Figura 18. Centro Agroecoturístico e Investigación San Juan de la Punta, localizado en el Municipio de Cuitláhuac, Veracruz.

Otras de las variables importantes para elegir este lugar, fue que tenía un espacio con una pendiente natural y disponible para la construcción del HA. Por otra parte, el dueño del emprendimiento turístico cuenta con plantas ornamentales que pueden ser utilizadas en este HA. Finalmente, el sitio se encuentra cerca del nacimiento y del cauce del Río Atoyac, cuerpo de agua con un grado de conservación alto y de gran importancia para la comunidad.

Por otro lado, el compromiso con el cuidado del medio ambiente, en particular del nacimiento del Río Atoyac que tiene el Señor Enrique, la actitud colaborativa y la solvencia de Playa la Junta como un centro turístico referente en la región, hacen de éste, un espacio óptimo para la implementación del HA y se garantiza el seguimiento del mismo una vez terminada nuestra participación.



Figura 19. Nacimiento del Río Atoyac. Centro Ecoturístico Playa la Junta.

7.2 Diseño del humedal artificial

7.2.1. Variables a considerar para la implementación del humedal artificial

La primera parte de la segunda etapa consistió en analizar diversas variables que van a determinar los elementos del diseño, las cuales se describen a continuación:

7.2.1.1. Tipo de agua a tratar

Aguas grises provenientes del área de cocina y del lavado de ropa que eran vertidas a través de una zanja hacía el Río Atoyac, práctica común en toda la localidad de Ojo de Agua y en la gran mayoría de las zonas rurales, periurbanas y en algunos casos hasta en zonas urbanas de países en vías de desarrollo de todo el mundo, como indican Morel y Diener (2006).

Si bien las aguas grises no contienen tantos patógenos comparadas con las aguas negras, un manejo inadecuado de éstas, puede representan un problema de salud pública, generan un impacto negativo en la economía local y en general es un factor que condiciona la calidad de vida de las comunidades.

Las aguas residuales de Playa la Junta se manejan por separado. En primera instancia, no cuentan con drenaje conectado a la red municipal, por lo que ellos

mismos deben encontrar la manera de subsanar esta carencia. De tal manera que para tratar las aguas provenientes de los escusados utilizan fosa séptica. En cuanto a las aguas grises, como ya se mencionó, son vertidas sin ningún tipo de tratamiento, incluidas las grasas provenientes de la cocina, para las cuales se requiere un tratamiento previo con una trampa de grasas.



Figura 20. Zanja de descarga de aguas grises al Río Atoyac de Playa la Junta.

Las razones de verter aguas grises pueden ser varias. En general, una de ellas es la falta de información en cuanto al contenido de las aguas grises. Las personas de la comunidad desconocen que este tipo de aguas pueden contener microorganismos dañinos para la salud humana o en su defecto, que el estancamiento de las mismas, puede ser un lugar propicio para la proliferación de los mismos.

7.2.1.2. Volumen de aguas grises generadas por día

Para obtener esta información, se tomó como referencia los días de mayor afluencia turística, así como los días que lavan ropa, debido a que estas actividades son las que mayor consumo generan en Playa la Junta (extra de sus actividades cotidianas), de acuerdo con la opinión de los encargados. Este ejercicio se realizó con la intención de conocer los puntos más altos de consumo, para sobredimensionar el sistema y así evitar posibles derrames.

El método para obtener el consumo, se realizó por medio del llenado de recipientes de 20 litros en los días mencionados y se realizó un promedio aproximado, debido a que el flujo no es constante. El resultado del pico más alto de consumo fue de 260 litros/día. Al respecto, la producción de aguas grises puede variar en gran medida por diversos factores.

De acuerdo con Huhn *et al.* (2015), la producción media de aguas grises por persona varía entre 30 y 120 litros dependiendo del acceso a agua entubada, los hábitos de la gente y su cultura. En general, el consumo en zonas rurales es mucho menor al de las zonas urbanas. Por ello, era de esperarse un nivel de producción de agua bajo en Playa la Junta, a pesar de ser un centro turístico que recibe visitantes.

Por otro lado, el consumo representado en litros o en volumen de agua, es un dato básico para poder dimensionar el tamaño del HA, entre otras características que más adelante se describen.

7.2.1.3. Ubicación del humedal artificial

La ubicación dependió de las condiciones que se observaron, como el espacio disponible y el estado físico del terreno. Además se consideró que el HA se construyera en un área no tan alejada de los usuarios para facilitar su cuidado, pero tampoco tan cerca por si hubiese problemas de olor o de mosquitos.

En este sentido, ambos inconvenientes se pueden evitar, cuidando que la parte superior del HA no presente espacios abiertos. Por esta razón se coloca algún material como tierra o arena en la parte de arriba del sistema, para evitar que ingresen huevecillos de moscos y también para evitar la salida de malos olores.

El HA de Playa la Junta se encuentra en la parte trasera de la cocina en donde se realizan principalmente actividades de lavado de trastes y preparación de alimentos. Su cercanía al establecimiento permite tenerlo en constante observación y tomando las medidas adecuadas se puede evitar la proliferación de mosquitos o malos olores. Además el acceso con el que cuenta la ubicación del HA, permite que

los visitantes puedan conocer de primera mano el sistema y comprender de manera sencilla el funcionamiento.

7.2.1.4. Tipo de suelo

Conocer el tipo de suelo donde se va a construir el HA es un factor muy importante, debido a que a partir de esto, se define el material con el que se va a realizar la estructura de la obra, que es la parte donde regularmente más recursos económicos se emplean. Por lo tanto, es un dato que puede ser decisivo para hacer el sistema o en su defecto optar por otra opción.

Para sistemas de HA domésticos, como es el caso del establecido en Playa la Junta no fue necesario hacer un estudio minucioso de suelo. Es suficiente con saber que tan arcilloso es el suelo, lo cual nos permite inferir si el terreno se compacta fácilmente o presenta condiciones de drenado altas.

De tal manera de que en caso de presentar condiciones de compactación altas o arcillosas, el HA se puede construir por debajo del suelo (como tumba) sin necesidad de repellar el piso y las paredes con ladrillos, block o colado, debido a que las condiciones arcillosas del suelo permiten que el sistema sea impermeable por sí solo.

El suelo donde se implementó el HA, presentó características de baja compactación o poco arcillosas, posiblemente porque el terreno durante muchos años tuvo vocación agrícola, principalmente el cultivo de caña, además de que se encuentra cercano a la orilla del río. Estas características fueron preponderantes para definir el rumbo del diseño del HA, así como los materiales de construcción descritos en la sección 7.3.2.

7.2.1.5. Destino del agua tratada

Existen diversas maneras de reutilizar las aguas residuales de todo tipo. El reúso dependerá de las características que tenga el agua, así como del tratamiento. Este reúso se puede clasificar en un sentido amplio en urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos deportivos y zonas residenciales; el industrial,

especialmente para sistemas de refrigeración de las industrias y el agrícola, en la irrigación de cultivos (Silva *et al.*, 2008).

Para el caso de las aguas grises a nivel doméstico, Penn *et al.* (2011) y Marín-Muñiz (2017), indican que se puede reutilizar para la descarga de escusados, lavado de patios y pisos, para el riego de jardines, riego agrícola, en el área acuícola, en la industria porcícola, para uso recreacional, así como para descargar de manera responsable en cuerpos de agua cercanos o para la recarga de acuíferos.

En el Centro Ecoturístico Playa la Junta el agua tratada tendrá como destino el riego de algunas plantas ornamentales y árboles frutales con las que cuenta el lugar, así como para fines de educación ambiental. Estos dos fines permiten definir el diseño de la parte final del HA y es un elemento muy importante en caso de requerir un sistema de riego específico para la reutilización de las aguas grises.

7.2.1.6. Multifuncionalidad del sistema

Los HA son sistemas multifuncionales. Pueden ser utilizados, además de su finalidad principal de remoción de contaminantes, para mejorar la calidad visual de paisaje, para fines recreativos o educativos en materia ambiental, para investigaciones científicas, así como para fortalecer la biodiversidad y los servicios ecosistémicos relacionados a éstos (Semeraro *et al.*, 2015).

De esta manera el HA implementado en Playa la Junta, pretende cumplir la mayoría de las funciones que pueden tener estos sistemas. Mismos que influyen de manera importante en el proceso de diseño.

Por un lado, la intención es que sea un HA demostrativo en un sentido educativo y científico principalmente, claro está, además de tratar las aguas grises y a la par, por medio del uso de una variedad de plantas, incluidas algunas ornamentales aportar a la mejorara de la calidad visual del paisaje, sin afectar la eficiencia de remoción de contaminantes.

Adicionalmente, el diseño del HA tiene como objetivo funcionar como un incentivo más para atraer visitantes interesados en el manejo sustentable de aguas residuales, que bien pueden ser alumnos de escuelas, científicos, personas de la localidad y los llamados nuevos turistas responsables ambientalmente, los cuales aumentan día a día (García-Henche, 2005).

De esta manera, la sencillez del tratamiento de aguas residuales por medio de HA, permite la generación de diseños alternativos que pueden potencializar la mencionada multifuncionalidad, por lo que es posible crear diversos modelos, siempre y cuando se sigan las normas básicas para la remoción de contaminantes, como el estudio de caso, donde se generó otro diseño en cuanto a la forma tradicional en rectángulo, así como con la combinación de plantas ornamentales con plantas de sistemas de humedales naturales.

7.2.2. Características del sistema de tratamiento

Una vez analizadas las variables anteriores, es posible determinar los elementos del diseño y construcción.

7.2.2.1. Tipo de humedal artificial

El humedal artificial seleccionado para tratar las aguas grises de Playa la Junta es de tipo subsuperficial de flujo horizontal (SSFH). Las razones para elegir este tipo de sistema sobre las demás opciones se describen a continuación:

7.2.2.1.1. Comparación con sistemas anaerobios convencionales

En primera instancia la cantidad de agua a tratar en Playa la Junta descarta la posibilidad de utilizar un sistema convencional anaerobio como los reactores de lodos activados, el cual se utiliza comúnmente para un núcleo de población grande. Otros sistemas anaerobios como el filtro percolador, el disco rotativo y los filtros sumergidos, bien pueden adaptarse a nivel doméstico, pero el principal argumento para elegir el HA sobre todos estos, son los bajos costos de construcción y principalmente de mantenimiento que posee comparado con los anteriores, además

de la notable estabilidad en la operación que presentan estos sistemas y la ventaja de que los HA no producen lodos, que mal manejados pueden generar problemas de contaminación y de salud pública (Hoffmann *et al.*, 2011).

Es importante mencionar que los HA tienen una capacidad similar de remoción de contaminantes que los sistemas de tratamiento anaerobios (Brix, 1995; Kadlec y Wallace, 2009; Tanner *et al.*, 2012), aunque la diferencia además de los costos, es que los HA requieren de áreas mucho mayores que estos sistemas y más aún si se pretenden tratar aguas residuales de poblaciones grandes.

Por estas razones, es complicado utilizar HA en zonas urbanas, sin embargo son sistemas con gran potencial en zonas rurales, donde regularmente se cuenta con extensiones de tierra más amplias y en especial en países en vías de desarrollo (Zhang *et al.*, 2014).

7.2.2.1.2 Comparación con lagunas facultativas

Otro sistema de tratamiento que tiene características similares a los HA en cuanto a la fiabilidad y simplicidad del proceso son las lagunas facultativas. No obstante, Hoffmann *et al.* (2011), indican que éstas presentan problemas de mosquitos al ser sistemas con superficies libres de agua, regularmente generan malos olores y la calidad del efluente contiene una alta producción de algas, lo que dificulta su reutilización.

7.2.2.1.3. Comparación entre humedales artificiales por régimen de flujo

En cuanto a los tipos de HA que existen, se pueden dividir en dos grupos de acuerdo al régimen de flujo: los de flujo libre de agua o flujo superficial (FS), que tienen como característica principal que el agua se encuentra expuesta a la superficie y los de flujo subsuperficial (SSF) donde el agua fluye por debajo de un sustrato sin estar expuesta en ningún momento a la superficie.

Primeramente, se compara la viabilidad en cuanto al régimen de flujo, es decir, entre los de FS y los de SSF. En este sentido, la UNEP (2007) recomienda el uso de humedales de SSF como medio primario de tratamiento, debido a que las

características del diseño evitan el contacto directo con la columna de agua, así como con la atmosfera. Por lo que se considera que los humedales de SSF son más seguros desde una perspectiva de salud pública.

Lo anterior, se debe a que los humedales de FS al tener expuesta la columna de agua expuesta a la superficie, pueden ser un medio propicio para la proliferación de larvas de mosquitos, que son vectores de distintos tipos de virus como el *Zika*, *Chikungunya* y *Dengue*, sobre todo en regiones tropicales como la zona de estudio.

Aunque si se considera implementar un humedal de FS es importante recalcar que existen varios métodos para erradicar mosquitos en este tipo de HA como lo mencionan Knight *et al.* (2003). Desde la implementación de peces depredadores de larvas de mosquitos, como el pez mosquito (*Gambusia affinis*), la utilización de vegetación repelente y cuestiones de tipo hidráulico que permiten combatir estos organismos.

Los humedales de FS se utilizan para tratamientos de efluentes secundarios o terciarios para pulimiento de agua y se diferencian también de los de SSF por la variedad de plantas que se pueden emplear (emergentes, flotantes y sumergidas), por lo que son sistemas que presentan mayor diversidad y aportan en gran medida a la estética del lugar. Por lo tanto, es posible combinar ambos sistemas para el tratamiento de agua residual, si se consideran las precauciones descritas.

7.2.2.1.4. Comparación entre humedales SSFH y SSFV

Los humedales de SSF se pueden dividir de acuerdo a la dirección de entrada del flujo al sistema, en horizontal (SSFH) y vertical (SSFV) (para más detalles ver sección 4.9.). Ambos sistemas comparten diversas ventajas frente a otros tipos de tratamiento, aunque difieren en algunos puntos específicos en cuanto a la eficiencia de remoción y diseño. Las ventajas de acuerdo con diversos autores (Kivaisi, 2001; Solano *et al.*, 2004; Kadlec y Wallace, 2009; Vymazal, 2010) son las siguientes:

Bajo costo de operación y mantenimiento, proporciona un tratamiento de aguas residuales efectivo y confiable (alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos), no requiere energía eléctrica, no genera mosquitos ni malos olores, las

plantas sembradas pueden servir como alimento para animales, así como para la venta con ornamentales, se puede construir con personas de la comunidad y reparar con materiales disponibles localmente, además genera beneficios indirectos tales como espacios verdes, hábitats de vida silvestre y áreas educativas.

Se ha demostrado que los SSFV tienen un rendimiento un poco mayor en cuanto a eficiencia de remoción de contaminantes (Zhang *et al.*, 2014) y requieren aproximadamente 20% menos de área (Hoffmann *et al.*, 2011). Por otro lado, el diseño de éstos requiere mayor altura que los SSFH, lo cual puede compensar la diferencia del área requerida en caso de tratarse de un HA doméstico.

Por otro lado, los SSHV requieren más acciones de operación y mantenimiento que los de SSFH y debido a que la eficacia del tratamiento depende del intervalo en que se da la carga (de 4 a 8 veces al día), es necesario tener un conocimiento técnico más especializado para el diseño, en cambio, la alimentación del SSFH es de flujo continuo (*ibíd.*), aunado a que en algunas ocasiones los SSHV requieren de sistemas de bombeo para su alimentación, lo que aumenta los costos.

En resumen, se eligió el SSFH por la sencillez en cuanto a su diseño, construcción y bajo mantenimiento, además de que el costo de construcción puede ser más reducido. Otra fuerte razón para haber elegido este sistema, radica en que uno de los objetivos primordiales del trabajo, es que el HA pueda ser fácilmente replicado por otros miembros de la comunidad sin necesidad de elaborar diseños complejos y el SSFH cumple con ese criterio.

7.2.2.2. Dimensiones del sistema

La determinación de las dimensiones del HA se calculó en función del volumen de agua que se va a tratar, por medio de la ecuación general propuesta por Kadlec y Wallace (2009):

$$A = \frac{Q * TRH}{1000 * d * n}$$

Donde:

A = Área a ocupar por el HA

Q = Agua que se utiliza diariamente

TRH = Tiempo de Retención Hidráulica

1000 = Factor de conversión de litros a metros cúbicos

d = Profundidad del HA

n = Porosidad del sustrato a utilizar en el HA

Algunos datos para calcular el área se pueden obtener de manera indirecta con información en la literatura científica, derivada de otras experiencias alrededor del mundo con HA. Tal es el caso del TRH, el cual consiste en el tiempo que transcurre el agua desde su punto de entrada hasta la salida y es un factor clave para la remoción de contaminantes.

En este sentido, para el tratamiento de aguas grises, el TRH varía entre 3 y 5 días (Crites y Tchobanoglous, 1998; Ling *et al.*, 2009), todo dependerá de la carga orgánica que contenga el agua a tratar, el nivel de reducción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) esperado, así como el pretratamiento. En el HA de Playa la Junta, se determinó un TRH de 3 días para dimensionar el sistema.

Por lo tanto, el TRH determinado se encuentra dentro de los estándares óptimos de remoción para aguas grises, tomando en cuenta que el sistema cuenta con un proceso de pretratamiento por medio de una trampa de grasas, la cual separa aceites y grasas, además de retener sólidos grandes como restos comida.

En cuanto a la porosidad, es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total. En este caso, es un parámetro que permite conocer el volumen real de agua que puede entrar al sistema tomando en cuenta el espacio que ocupa el sustrato. En el HA de estudio, la porosidad fue del 0.45%.

Para calcular este dato, se procedió a los siguientes pasos:

Paso 1: llenar un recipiente de volumen conocido (cubeta de 20 litros) con el sustrato que se usará en el HA. En este caso, tezontle.

Paso 2: Posteriormente, la cubeta se va llenando de agua con un recipiente de volumen conocido (botella de 2 litros) hasta alcanzar la superficie.

Paso 3: Se suman los litros que fueron necesarios para alcanzar la superficie

Paso 4: Se dividen los litros entre el volumen del recipiente y así se determina el porcentaje de porosidad que tiene el sistema.

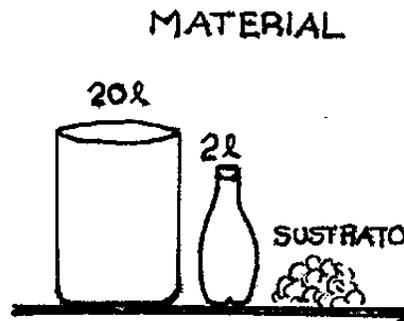


Figura 21. Material necesario para prueba de porosidad.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que dependerá del tipo de sustrato a utilizar para realizar esta prueba. En este caso se utilizó tezontle, pero en caso de usar otro material, se sigue el mismo procedimiento. La ventaja de este proceso, es la accesibilidad en cuanto a los materiales, así como la sencillez de la aplicación.

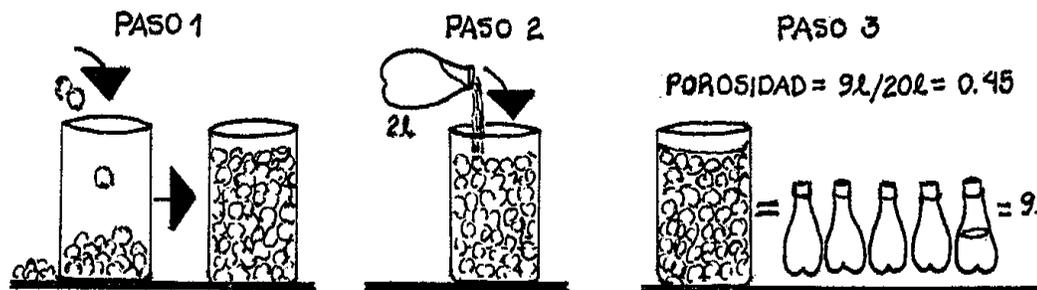


Figura 22. Proceso para calcular la porosidad del HA.
Fuente: Elaboración propia.

La profundidad o altura del HA de acuerdo con diversos autores de manuales de diseño y construcción como Morel y Diener (2006), UN-HABITAT (2008), UNEP (2007) y Hoffmann *et al.* (2011), recomiendan como mínimo 40 cm y un máximo de 80 cm en humedales de SSFH. El HA de Playa la Junta cuenta con una profundidad de 55 cm.

Una vez que se tienen todos los datos es posible dimensionar el tamaño del HA:

$$A = \frac{260 \text{ l} * 3 \text{ días}}{1000 * 0.55 \text{ m} * .045} = 3.15 \text{ m}^2$$

El área del HA debe contar mínimo de 3.15 m² para tratar las aguas residuales diariamente y no tener problemas de derrames los días de mayor consumo. Por lo que se dimensionó un área de 3.85 m² por el aporte de las precipitaciones del lugar en temporada de lluvia, así como para obtener espacio de sobra disponible para cualquier eventualidad.

Al respecto, Hoffmann *et al.* (2011), aseveran que un HA sobredimensionado no tiene ningún problema en cuanto a la eficiencia de remoción e incluso son más resistentes. En este sentido, con el área sobredimensionada aumentó el TRH a 3.6 días, lo cual no afecta el proceso de remoción.

Otro aspecto de enorme importancia en las dimensiones del HA, es la proporción que debe haber entre el largo y ancho del sistema. Se recomienda que mínimo se tenga una proporción largo-ancho 1.5:1 (García-Serrano y Corso-Hernández, 2008; Huhn *et al.*, 2015). En el caso del HA de Playa la Junta, la proporción es 3.2:1, por lo que cumple con más del doble del mínimo requerido.

La razón de dicha relación, obedece a que el proceso de tratamiento de agua ocurre a lo largo del sistema, del punto inicial al final, por lo que el ancho en HA no juega un papel tan determinante durante el proceso. Sin embargo, para cuestiones de manejo y mantenimiento, es importante considerarlo.

7.2.2.3. Pretratamiento (trampa de grasas)

El tratamiento previo de las aguas residuales es un paso de suma importancia para el correcto funcionamiento de los HA, debido a que actúa como el primer filtro del sistema. El papel primordial del pretratamiento, radica en retener los sólidos en suspensión y las partículas más grandes contenidas en las aguas residuales como el papel higiénico, restos de comida y otros desechos, así como un poco de materia orgánica, para evitar taponamientos en las entradas del HA y de paso aportar a la reducción de contaminantes en el agua.

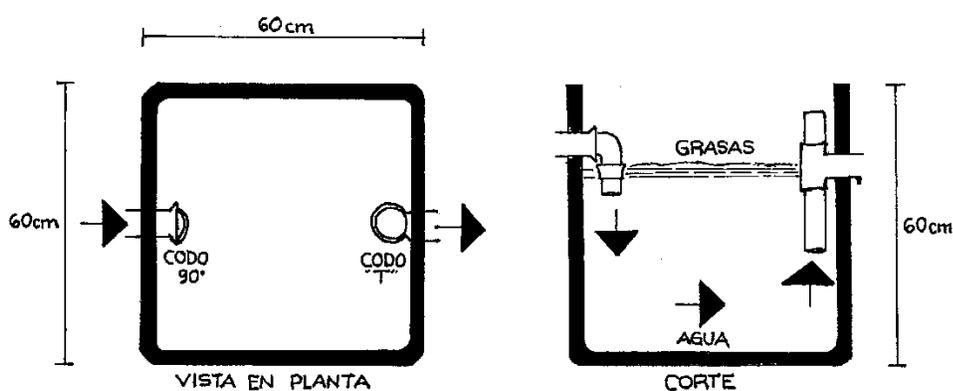


Figura 23. Esquema de la trampa de grasas.
Fuente: Elaboración propia.

El método varía respecto al tipo de agua que se pretende tratar. En el caso de las aguas grises de Playa la Junta que provienen del lavado de ropa y trastes de cocina, solo fue necesario instalar una trampa de grasas, la cual además de separar por diferencia de densidad los aceites, grasas y mantecas de la cocina, retienen sólidos grandes como restos de comida (Figuras 23 y 27).

De esta manera, el agua que entra al HA no presenta sólidos grandes, que pueden tapar las entradas. Por otra parte, la implementación de este sistema, evita la obstrucción de los poros del sustrato ocasionado por las grasas, espacios donde se encuentran microorganismos benéficos para la remoción de contaminantes.

7.2.2.4. Tipo de sustrato

El tipo de sustrato, también llamado lecho o material filtrante, cumple con una variedad de funciones esenciales en el sistema de HA y en el proceso de tratamiento. Por lo que la correcta selección de este elemento representa el éxito o en su defecto el fracaso del HA.

En primer lugar, retiene sólidos de las aguas residuales pretratadas, de las cuales la fracción orgánica se degrada posteriormente. En segundo lugar, los medios filtrantes proporcionan una superficie para la adhesión y desarrollo de los microorganismos que juegan un papel crucial en la degradación de los contaminantes orgánicos y la transformación de los compuestos nitrogenados. Y, en tercer lugar, las plantas de humedales (macrófitas) desarrollan en el sustrato sus sistemas radiculares para su fijación y desarrollo (Gauss, 2008).

La elegibilidad del sustrato depende de factores como la permeabilidad, así como la accesibilidad del mismo, ya que al no tener disponible una fuente cercana del material, puede representar costos extra. En el HA de Playa la Junta, se eligió el tezontle como material filtrante, debido a dos razones: la disponibilidad y la eficacia de este material acuerdo a diversos estudios realizados en México (ver Tablas 1 y 2). De hecho, es el sustrato más utilizado en México para tratamiento de agua con HA de flujo subsuperficial.

En cuanto a su distribución dentro del sistema, es muy importante colocar en las entradas y salidas de agua, rocas de mayor tamaño que el diámetro de la tubería. Esto para evitar taponamientos y garantizar que el agua fluya de manera correcta por el sistema. Además, se recomienda poner en el piso del HA rocas grandes para prevenir la formación de lodos en el fondo.

El espacio restante, es donde va a estar presente el sustrato destinado para cumplir con las funciones antes mencionadas y dependiendo del tipo de diseño, es posible mezclar diferentes tipos de sustrato como arena, grava, roca volcánica o hasta PET, de acuerdo a los objetivos de cada estudio.

Por último, se debe asegurar que el nivel de agua del HA debe mantenerse en todo momento entre 10 y 15 cm por debajo de la superficie del sustrato, con la intención de evitar encharcamientos en la parte superior del HA, lo cual permite la proliferación de mosquitos o de malos olores.

7.2.2.5. Tipos de plantas a utilizar

De acuerdo con Gauss (2008), las plantas juegan diversos papeles en los humedales de flujo subsuperficial. Sus sistemas radicales proporcionan superficies para la unión de microorganismos, mejoran los efectos de filtración y estabilizan la superficie del lecho. Las raíces contribuyen al desarrollo de microorganismos por la liberación de oxígeno y nutrientes. Además, las plantas dan al sitio de tratamiento una apariencia atractiva, y algunas especies de plantas se pueden usar para varios propósitos después de la cosecha y a mayor escala, proveen un hábitat conveniente para la vida silvestre

En este trabajo se optó por utilizar un policultivo demostrativo de los diferentes tipos de plantas que se pueden utilizar en un HA. Cada una de las especies seleccionadas ha sido estudiada en investigaciones de todo el mundo, pero se hizo énfasis en los trabajos realizados en México (ver Tablas 1 y 2).

La lógica de la distribución de las plantas en el diseño del HA establecido en Playa la Junta, obedece a un proceso de eficiencia de remoción que va de mayor a menor y al uso de plantas con otros fines, como son la estética y la mejora de la calidad del paisaje (Figura 24), como se menciona a continuación:

1. En la primera sección, que es donde ingresan las aguas grises pretratadas por la trampa de grasas y en teoría la que contiene mayor carga de contaminantes, se colocaron plantas de ecosistemas de humedales naturales, que han demostrado niveles altos de remoción de contaminantes y se encuentran dentro de las más utilizadas en todo el mundo en HA: *Thypha latifolia* y *Cyperus alternifolius* (Vymazal, 2011).

2. La segunda sección, corresponde a plantas ornamentales adaptadas a condiciones húmedas que tienen valor comercial y que han demostrado en diversas investigaciones tener la capacidad de remover contaminantes casi con la misma eficiencia que las plantas comunes de humedales naturales: *Zantedeschia aethiopica*, *Canna spp.* y *Alpinia purpurata* (Ver Tabla 2).
3. Por último, en la tercera sección se colocaron plantas ornamentales con alto impacto visual que han demostrado adaptabilidad a condiciones húmedas y por periodos cortos a inundación, las cuales además remueven contaminantes: *Strelitzia reginae* y *Agapanthus africanus* (Zurita *et al.*, 2009; Tejada *et al.*, 2014; Zurita *et al.*, 2015;).

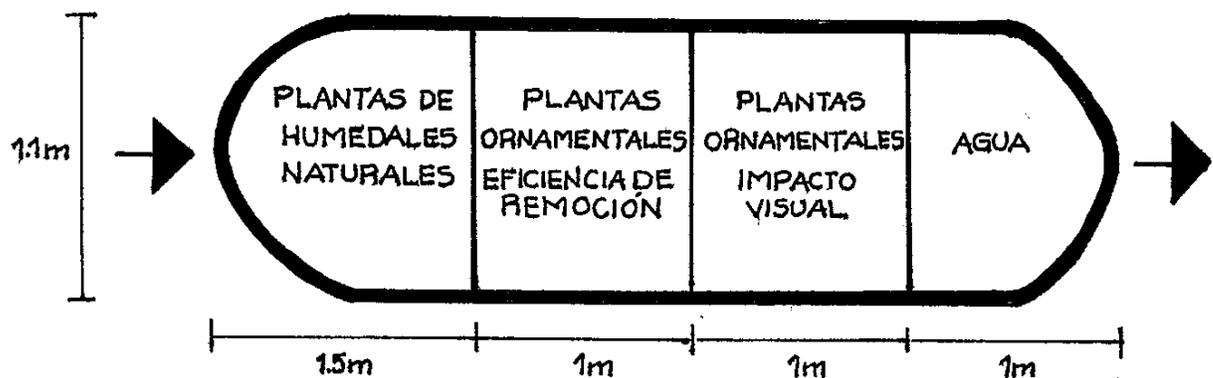


Figura 24. Distribución de plantas de acuerdo a su eficiencia de remoción y necesidades de los objetivos de Playa la Junta.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar, que de acuerdo con Vymazal (2011), los HA sembrados con sistemas de policultivos, son los que presentan un mejor desempeño y consistencia en la remoción de todos los parámetros del tratamiento de aguas residuales y además son menos susceptibles a las variaciones estacionales en comparación con monocultivos.

Estas características se presentan debido a que al sembrar policultivos en HA, se genera una distribución más efectiva de biomasa en las raíces, lo cual proporciona un hábitat para una población microbiana de mayor diversidad, en comparación con

los sistemas que solo tienen una especie, entre otras interacciones ecológicas que suceden entre las especies (Wu *et al.*, 2012).

Por último, se indican una serie de sugerencias para la selección de plantas, en concordancia con Hoffmann (2011):

- Usar especies locales, autóctonas y no importaciones exóticas o especies invasoras.
- Usar especies de plantas que crecen naturalmente en los humedales o riberas de los ríos debido a que sus raíces ya están adaptadas a crecer en condiciones de agua saturada.
- Son preferibles las plantas con raíces extensas y sistema de rizomas subterráneos
- Las plantas deben ser capaces de soportar altas cargas, así como cortos periodos de sequía.
- Las plantas no requieren de inundaciones permanentes, pero deben ser capaces de afrontar temporadas de inundación y encharcamiento en el suelo donde se desarrolle.

7.2.2.6. Diseño final

Derivado del estudio del conjunto de las variables que determinaron los elementos del diseño, se propuso un tren de tratamiento (Figura 25), que incluye un pretratamiento con la trampa de grasas, el HA con un policultivo y el depósito de agua tratada, donde se puede observar de manera superficial el proceso del tratamiento de agua del sistema implementado.

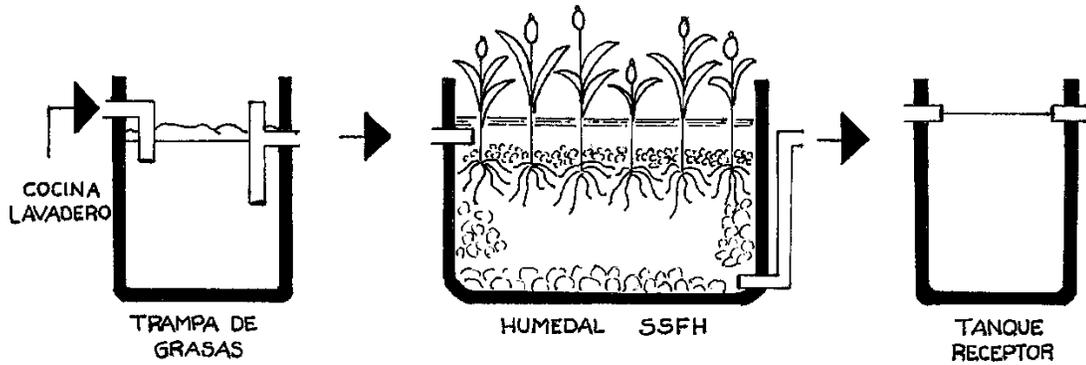


Figura 25. Proceso de tratamiento de agua en el HA de tipo demostrativo.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que para evaluar fehacientemente la eficiencia de remoción de contaminantes, es necesario realizar estudios de la calidad de agua, los cuales se realizarán después de un periodo entre cuatro y seis meses, una vez que el sistema se estabilice.

7.3. Construcción del humedal artificial

Una vez que se cuenta con el diseño final es preciso iniciar con los trabajos de construcción, para los cuales se sugiere hacer una planeación con el maestro de obra con tiempos y metas definidas. Esto se hace principalmente para aprovechar al máximo los recursos disponibles y no generar costos extra de mano de obra.

Para ello, se debe calcular eficazmente y con anticipación el material necesario, para que dentro de las posibilidades de cada proyecto, contar con todos los materiales disponibles de acuerdo a la programación, con la intención de evitar retrasos y gastos innecesarios.

7.3.1. Programa de construcción

La programación de las actividades de construcción del HA de Playa la Junta fue el siguiente:

Tabla 5. Programa para la construcción del humedal artificial en Playa la Junta, Ojo de Agua, Amatlán de los Reyes, Veracruz.

Día	Actividad	Observaciones
1	Trazar y pasar niveles y aplanado del terreno	Esta actividad es elemental para cualquier tipo de construcción. La parte que más interesa es la de conocer las pendientes naturales para ver si se pueden aprovechar al momento de construir el HA
2	Montaje del piso	Debido a las condiciones del terreno, se decidió montar un piso extra como base antes de poner la estructura del HA. Esto por un lado garantiza que no habrá filtraciones y por otro aumenta la durabilidad del sistema
3	Montaje de piso	El piso tuvo de largo 5.5 m y un ancho de 1.4 m. Se hizo un poco más grande que las medidas del HA, con la intención de que sobrara espacio para la estructura
4	Cimbrado para levantar muros	Al momento de colar el piso, se cimbró la estructura de los muros con malla electrosoldada
5	Reforzamiento de triplay para muros	Debido a la forma “de barco” del HA, fue necesario reforzar el cimbrado con madera de triplay para obtener la forma deseada. En este caso, la forma elegida no influye en el funcionamiento del HA.
6	Colado para los muros	Una vez colocada la cimbra y el refuerzo de triplay, se colaron los muros de 12cm de ancho
7	Colado del piso dentro del HA	Se procedió a colar el piso que va dentro del sistema con una pendiente de 1°. Con esta acción el piso del HA se engrosó de

- manera considerable, lo cual garantiza la impermeabilidad del sistema.
- 8 Construcción de la trampa de grasas Consiste en un cubo de 60x60x60 cm con el detalle de que el tubo de PVC de la entrada es más corto en profundidad que el de salida, lo que permitirá que las grasas se separen por densidad y así captar solo agua libre de grasas hacia el HA. La trampa debe tener una altura mayor al HA, para que el agua fluya por gravedad
- 9 Instalación de tubería de PVC La instalación de la tubería en este tipo de HA es muy sencilla. Se utilizaron tubos de 1½" tanto en la entrada como en la salida. Es importante resaltar que por cuestiones hidráulicas el tubo de salida es en forma de ganso (Ver Fig. 27). En la entrada al HA se debe colocar una llave de paso para regular el flujo.
-

El programa de construcción originalmente estaba previsto para 7 días, pero se presentaron algunas dificultades técnicas en la parte de los muros. Esto se debió a la forma con la que se diseñó el HA. Por otro lado, debido a las condiciones climáticas con fuertes precipitaciones, hicieron que la obra se retrasara aún más, por lo que la construcción se realizó en un transcurso de 15 días.

Día 1. Trazado de niveles



Días 2. y 3. Montaje del piso



Día 4. Colado piso y cimbra muros



Día 5. Reforzamiento de triplay para muro



Día 6. Colado para los muros



Día 7. Colado del piso dentro del HA



Figura 26. Etapas de construcción de la estructura del HA.

8. Construcción de la Trampa de grasas



9. Instalación de tubería de PVC



Figura 27. Construcción de la trampa de grasas e instalación de tubería.

7.3.2. Materiales y costos

Tabla 6. Costos y materiales para la construcción del HA en Playa La Junta.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (\$)	Importe (\$)
Cemento	13 bultos	125	1625
Arena	1.2 m ³ (a granel)	-	500
*Grava	1.1 m ³ (a granel)	-	450
Block	10 piezas	5	50
*Cal	2 bultos	31	62
Tezontle	2 m ³ (a granel)	-	600
Tubería de PVC	1 tramo de 6m	150	150
Uniones de PVC	4 piezas	10	40
Pegamento PVC	1 lata	114	114
Válvula esfera	1 pieza	90	90
TOTAL:			\$3681

*Estos materiales fueron aportados por el propietario de Playa La Junta, así como el gasto por la contratación de un maestro albañil, que asciende a un total de \$1200 aproximadamente.

La Tabla 6, muestra los materiales utilizados para la construcción del HA, sin tomar en cuenta las herramientas necesarias de trabajo, ni la mano de obra, así como una parte elemental del sistema, que son las plantas, las cuales fueron donadas por el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba y otras por parte del propietario de Playa la Junta, cosechadas de las plantaciones de ornamentales existentes en el sitio.

De esta manera, las plantas que se encuentran dentro de Playa la Junta, están adaptadas a las condiciones climáticas del lugar, lo que cual permite mayor resistencia a cambios, un mejor desarrollo en cuanto a crecimiento y floraciones más abundantes, además de que en caso de necesitar un recambio de éstas, se puedan obtener de manera rápida sin ningún costo adicional.

Tabla 7. Costos y materiales para la construcción de la trampa de grasas.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (\$)	Importe (\$)
Cemento	1 bultos	125	125
Arena	6 botes	14	84
*Grava	5 botes	14	70
Block	20 piezas	5	100
Uniones de PVC	6 piezas	10	60
TOTAL:			\$439

En el caso de la trampa de grasas, como se puede verificar en la Tabla 7, los materiales utilizados fueron mucho menores al HA y el costo es menor, debido a que es una estructura de fácil construcción y no requiere elementos técnicos especializados para su implementación.

En total el HA de Playa La Junta tuvo un costo de **\$4120**, sin considerar el costo de la mano de obra que puede variar dependiendo la región y sobre todo de la organización y participación entre las partes de un proyecto de esta índole. En este caso, los gastos fueron compartidos, de tal manera que los beneficiados aportaron aproximadamente 30% del total del costo del HA.

Se recomienda ver Hernández-Alarcón (2016), para comparar el gasto entre sistemas de tratamiento convencionales de lodos activados y el uso de HA, donde se traten mayores volúmenes de aguas residuales.

7.4. Taller educativo para la construcción del humedal artificial

Una vez terminada la estructura del HA con la trampa de grasas y todas las conexiones necesarias al punto de descarga de aguas grises, se procedió a organizar un taller demostrativo denominado “Diseño de un Humedal Artificial”, donde el objetivo principal fue aprender una técnica sustentable para el tratamiento de aguas grises, por medio de un policultivo que incluye plantas de humedales naturales y plantas ornamentales, así como sus diversas aplicaciones en proyectos en zonas rurales.

El taller fue dirigido a actores clave, principalmente de la MAP-Centro de Córdoba, aunque asistieron también encargados y representantes de proyectos de la MAP-Chocamán, maestros de la Universidad Veracruzana (UV), Unidades de Manejo Ambiental (UMA) y miembros de Asociaciones Civiles (A.C.) de la región.

El motivo de convocar al taller a las personas mencionadas, se fundamenta en el impacto y la difusión que pueden generar al ser líderes en sus comunidades, encargados de proyectos de turismo, propietarios de UMAs o en el caso de los maestros de la UV, fomentar estas ecotecnologías en la comunidad estudiantil.

La dinámica del taller, consistió en que los participantes realizaran las actividades propias de la preparación de un HA, con la intención de que no solo conocieran la parte teórica, sino que también aprendieran más del sistema haciendo las cosas ellos mismos. En otras palabras, aprender los conceptos a través de la práctica, como menciona Wompner y Montt (2007).

Si bien los participantes no intervinieron en el proceso de la construcción de la estructura del HA, sí pudieron realizar los trabajos más importantes al poner en marcha un HA, como lo es el llenado de la celda filtrante con los sustratos indicados, su distribución, la siembra de plantas, la elaboración de sustrato biológico para las plantas, así como la parte teórica de los cálculos necesarios para el HA (Figura 28).

Cabe resaltar que en la primer parte del taller, se expusieron las bases teóricas del sistema de tratamiento de agua, las recomendaciones en cuanto al tipo de sustratos

a usar, especies plantas para HA, proceso y materiales de la construcción, los beneficios extra que pueden proveer estos sistemas, además de tratar aguas residuales con estudios de caso en México y en general el contexto tanto a nivel mundial como local de la compleja situación del manejo integrado de los recursos hídricos en todos sus niveles.



Figura 28. Actividades del taller "Diseño de Humedales Artificiales".

Al final del taller, se aplicó una encuesta (anexo 1), para conocer la perspectiva de los participantes en cuanto al manejo de las aguas residuales y lo aprendido en el taller. Un total de 29 encuestas fueron aplicadas, a continuación se describe brevemente la opinión de los encuestados.

Respecto al conocimiento sobre el impacto de las aguas residuales, 62% de los participantes (Figura 29) respondió desconocerlos, lo cual pone en evidencia la falta

de información en el tema, a pesar de que la mayoría de los encuestados están vinculado de forma directa o indirecta al cuidado del medio ambiente. Sin embargo, casi la mitad de los encuestados (48%), conoce algún tipo de tratamiento para aguas residuales.

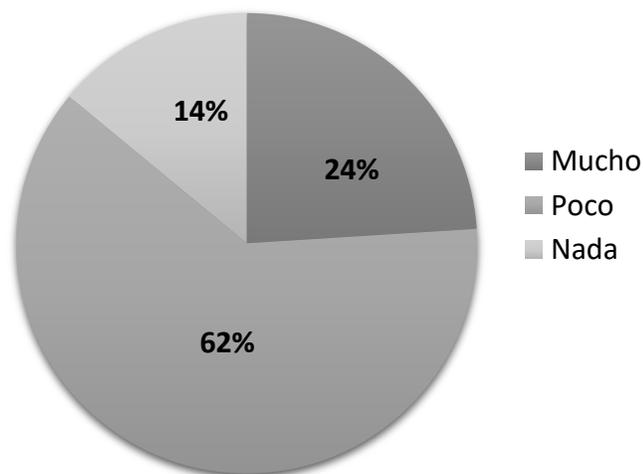


Figura 29. Conocimiento del impacto de las aguas residuales en el medio ambiente.

Por otro lado, se les preguntó si consideraban que el costo de un HA promedio era elevado, a lo cual la gran mayoría, 72%, respondió que no, siempre y cuando genere algún beneficio extra como el estético o la posibilidad de sembrar especies ornamentales para su venta. El resto de los encuestados mencionaron que el costo monetario es elevado, pero se compensa por el hecho de cuidar el agua.

En caso de tener oportunidad de implementar un HA en una localidad (Figura 30), 62% de los participantes opina que prefiere humedales por hogar, 24% piensa que es mejor opción un humedal a gran escala para la comunidad y por último, 14% opta por la instalación estratégica de humedales por colonia. El resultado de esta pregunta, es un indicio de la viabilidad de optar por soluciones de menor escala a nivel familiar como los HA, sin tener que esperar la constante dependencia de gobierno.

Los participantes mencionaron que dentro de los aprendizajes más significativos del taller, el cuidado del medio ambiente y en particular del agua por medios

naturales son muy importantes y destacaron que el conocer alternativas sencillas, de bajo costo y a la mano de cualquier persona como los HA, resulta de suma importancia para el manejo sustentable de agua de manera accesible para diferentes sustratos sociales.

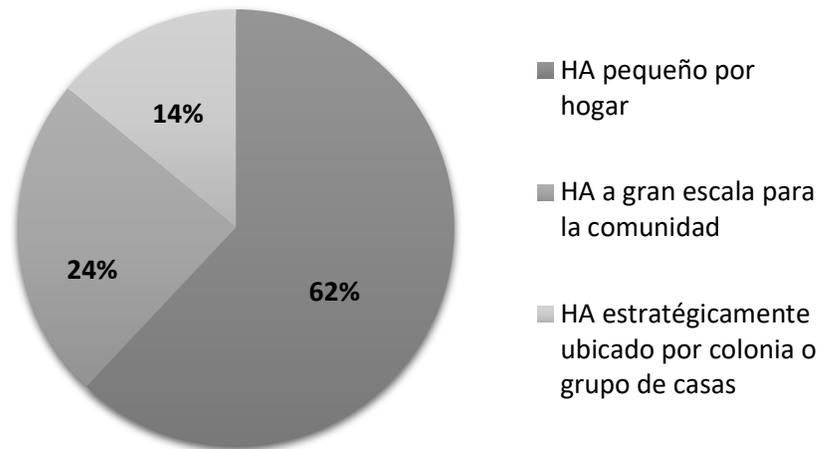


Figura 30. Preferencias en la implementación de un HA en una localidad.

Por último, 3 de cada 4 participantes indicaron que lo aprendido en el taller puede ser aplicado en su vida cotidiana (Figura 31), lo cual refleja que la metodología para implementar un HA es asequible para la gran mayoría.

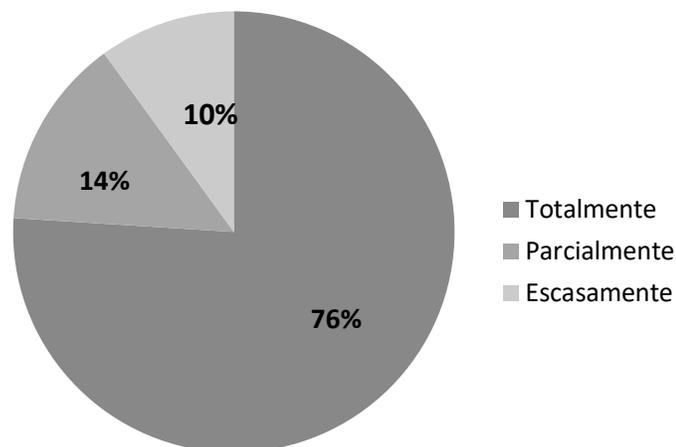


Figura 31. Aplicabilidad de lo aprendido en el taller a su vida cotidiana.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El proceso para la implementación del HA en Playa la Junta, requirió en primera instancia de una exhaustiva revisión de literatura sobre el estado del arte de los HA principalmente de México, con la intención de tener un panorama amplio de los diversos métodos y elementos utilizados en diferentes contextos del país.

Con respecto a lo antes mencionado, esta investigación contribuye significativamente al acervo científico en cuanto a HA en México se refiere. En específico, las Tablas 1 y 2 representan un nuevo aporte sobre la variabilidad de esta ecotecnología en el país, que por un lado, coadyuvó a la elección de algunos de los elementos del HA de Playa la Junta, pero sobre todo, es una guía referencial para la comunidad científica y en general para personas interesadas en el tema.

El siguiente paso que solventó la implementación del HA en Playa la Junta, fue la experiencia adquirida en los HA de San José Pastorías; factor determinante en el proceso de diseño y en la planeación de la etapa de construcción. Así, la importancia de la estancia realizada en dicha localidad, radicó en la síntesis de los conceptos teóricos, en aspectos prácticos, reflejados de manera concreta en el HA de Playa la Junta.

El objetivo de la estancia se cumplió por medio de la aplicación directa del aprendizaje obtenido, a través de la transferencia tecnológica dentro de las actividades turísticas que se desarrollan en el medio rural, lo cual contribuyó al aprovechamiento y conservación sustentable de los recursos naturales, en este caso del agua.

El funcionamiento del HA hasta el momento ha sido adecuado. En general, el sistema ha empezado a tratar el agua proveniente del lavado de ropa y de las actividades de la cocina, lo que indica que el proceso que se siguió para determinar el diseño, así como el plan de construcción fueron acertados.

Además, el personal de Playa la Junta, está totalmente familiarizado con el funcionamiento del sistema y en particular el Señor Enrique Espinoza, dueño del sitio donde se instaló el HA, el cual está capacitado para explicar el proceso de remoción a cualquier persona o grupos que asisten al lugar. Por lo que uno de los objetivos primordiales del trabajo se cumplió cabalmente.

En este contexto, se concluye que el desarrollo exitoso de un proyecto de saneamiento de agua por medio de esta técnica, debe incluir la participación de las personas que tendrán bajo su cargo el HA. Esto incluye la impartición de capacitaciones para que comprendan como usuarios del sistema, los beneficios de tratar adecuadamente las aguas residuales, así como los compromisos que deben adquirir en las etapas de construcción y funcionamiento del HA.

En relación al taller educativo de HA realizado, los participantes mostraron un gran interés por replicar lo aprendido en Playa la Junta. Principalmente los propietarios de centros ecoturísticos, debido a que a través de la metodología aplicada en el taller (aprender-haciendo), pudieron corroborar la accesibilidad en cuanto al diseño, construcción y funcionamiento del HA.

De igual forma, los maestros y alumnos universitarios que asistieron al taller, se comprometieron a implementar un HA en su casa de estudios, para lo cual se está colaborando con la asesoría que requiere el diseño de este sistema. Lo que representa una evidencia más de que el taller impactó positivamente en la gran mayoría de los participantes.

Por otra parte, el taller sirvió como plataforma, para exponer la problemática y consecuencias de hacer un manejo inadecuado de las aguas residuales, tema que más de la mitad de los asistentes desconocía a fondo, siendo que en su mayoría son personas que desde diversos frentes se dedican a la promoción del cuidado de los recursos naturales. Por lo tanto, la dinámica tuvo un impacto positivo en cuanto a la concientización del entorno que nos rodea.

En cuanto al tratamiento específico de aguas grises, el HA diseñado en Playa la Junta, funciona como ejemplo en la región no solo para evitar descargas que afecten al Río Atoyac, también es una muestra tangible de cómo se puede reutilizar el agua tratada en otras actividades domésticas, y a mayor escala, podrían representar una fuente continua de agua para riego en temporada de estiaje.

El HA de Playa la Junta, al ser de tipo demostrativo, ejerce un papel como modelo para proyectos de mayor envergadura y abre el abanico de posibilidades para diferentes usos. De los cuales, destaca la siembra de plantas ornamentales, que además de ser eficientes en la remoción de contaminantes y proveer un espacio con altos estándares estéticos, son productos comerciables que pueden generar beneficios económicos adicionales en donde se instale.

En ese mismo orden de ideas, es notable que muy pocos trabajos han sido diseñados para ser aplicados. La gran mayoría de los estudios encontrados de HA con especies ornamentales son de tipo experimental. Sin embargo, se tienen precedentes en México del éxito que pueden tener, aunado al respaldo científico demostrado en cuanto a la eficiencia para tratar diversos tipos de agua residual. Todo esto hace posible integrar actividades como el turismo de naturaleza dentro del contexto del manejo eficiente de los recursos hídricos.

Finalmente, este trabajo contribuye a la apertura de un campo poco explorado del manejo de los recursos hídricos en el sector turístico, en particular el que se desarrolla en zonas rurales y permite vislumbrar que la colaboración entre distintos sectores de la sociedad con un fin común, decanta en propuestas hechas realidad para la mejora de los ecosistemas y por ende del desarrollo social.

8.2. Recomendaciones

- ❖ En primera instancia, para la implementación de cualquier ecotecnología, se recomienda enfáticamente tener conocimientos previos de todos los elementos que conlleva el diseño, la construcción, los costos, los beneficios, así como la viabilidad en cuanto al contexto de la zona o región donde se desea hacer uso de estos sistemas. Más aún si se trata de un tema de carácter de salud pública como lo es el manejo de las aguas residuales.
- ❖ Una correcta capacitación previa para aplicar una ecotecnología como los HA, permite que la sociedad en general pueda corroborar los beneficios y las notables ventajas que conlleva hacer uso de alternativas ecológicas para el manejo eficiente de los recursos naturales. De lo contrario, el mal funcionamiento de alguna de éstas, se convierte en una desaprobación social de mayor alcance, debido a que está comprobado que un sistema alternativo y nuevo en el mercado que no funciona correctamente, es desacreditado de manera inmediata y promocionado en mayor medida por su ineficiencia, que por sus beneficios.
- ❖ Para finalizar este importante tema de la preparación previa en la implementación de un HA o cualquier otra ecotecnología, es relevante mencionar que no necesariamente se requieren estudios académicos para hacer uso de estas alternativas. Por el contrario, la integración de los conocimientos adquiridos de manera empírica en el día a día de las comunidades rurales, en combinación con algunos elementos académicos, permiten expresar y explotar de mejor manera los alcances no solo de una ecotecnología, sino de cualquier proyecto en estos espacios.
- ❖ Por otro lado, se recomienda que los beneficiarios de un sistema como el HA de Playa la Junta, participen en todo el proceso de diseño, construcción y mantenimiento del sistema de tratamiento, así como en la colaboración mutua, ya sea de manera económica, con mano de obra o con el aporte de

algunos materiales. Todo esto con la intención de fomentar el apego y adopción del HA y en especial el entendimiento pleno de su funcionamiento. No se debe olvidar, que al final ellos son los usuarios directos del HA y responsables únicos de su buen funcionar.

- ❖ En otro orden de ideas, se recomienda que después de 4 a 5 meses de estar establecido el HA, se realicen pruebas que determinen la eficiencia de remoción de contaminantes en el efluente de salida, con la intención de verificar fehacientemente que el sistema trabaja correctamente y así en la medida de lo posible, repetir este proceso una vez al año.
- ❖ También, se sugiere la utilización de plantas ornamentales que estén probadas en cuanto a su eficiencia de remoción en HA. Para ello, es posible observar en la Tabla 2, que plantas pueden ser cultivadas, así como los tipos de sustrato que mejor se adapten a las condiciones de la zona.
- ❖ En este sentido, para fines científicos sería de gran utilidad experimentar con nuevas especies ornamentales presentes en México, ya sean nativas o exóticas, con la finalidad de diversificar los cultivos en los HA que permitan generar beneficios adicionales al tratamiento de aguas residuales y expandir así su uso en el país.
- ❖ En cuanto a la importancia del papel que juega la educación ambiental en los HA. Por ello, se recomienda la impartición de talleres de diseño o capacitación para la construcción de los mismos. En especial, se sugiere que la metodología del curso o taller, contenga una mayor carga de aspectos prácticos, que teóricos. Esto con la intención de que los participantes sean actores principales del aprendizaje y la información transmitida se plasme en proyectos concretos.

9. LITERATURA CITADA

- Agüero-Rodríguez, J.C. & Tepetla-Montes, J. (2013). El poder del agua en las Altas Montañas: Conflictos ambientales, de distribución y de apropiación. *La Jornada*. Recuperado el 24 de junio de 2017 de <http://www.jornada.unam.mx/2013/09/30/eco-c.html>
- Águila-Arreola, C. (2017). Se reactiva el conflicto en Akumal: Despliegue policiaco por incendio en Centro Ecológico. *La Jornada*. Recuperado el 14 de septiembre de 2017 de <https://www.lajornadamaya.mx/2017-03-05/Se-reactiva-conflicto-en-Akumal>
- Alarcón-Herrera, M.T., Valles-Aragón, M.C. & Olmos-Márquez, M.A. (2014). Retención y distribución de arsénico en el mesocosmos de humedales construidos. En: *Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua* (pp. 9-12). Morelia, Michoacán, México.
- Aliata, F. & Silvestri, G. (2001). El paisaje como cifra de armonía: relaciones entre cultura y naturaleza a través de la mirada paisajística. Buenos Aires, Argentina: Nueva Visión.
- Barceló, I.D., Rivas, A., Solís, H.E., García, J. Salazar, M., Giacomán, J. & Zetina, C. (2014). Comportamiento de un sistema humedal-laguna de maduración-humedal de pulimento a nivel piloto para el tratamiento de aguas municipales en la Universidad Autónoma Metropolitana de la Unidad Azcapotzalco en la Cd. de México, México. En: *Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua* (pp. 55-58). Morelia, Michoacán, México.
- Barnes, J., & Alatout, S. (2012). Water worlds: Introduction to the special issue of social studies of science. *Social Studies of Science*, 42 (4) 483–88.
- Barrera, E. (2006). Turismo rural: nueva ruralidad y empleo rural no agrícola. Buenos Aires, Argentina: OIT/CINTEFOR.

- Belmont, M.A. & Metcalfe, C.D. (2003). Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study. *Ecological Engineering*, 21, 233-247.
- Belmont, M.A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A. & Metcalfe, C.D. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering*, 23, 299-311.
- Bijker, W. E. (2012). Do we live in water cultures? A methodological commentary. *Social Studies of Science*, 42 (4) 624–27.
- Boege, E. (2008). El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México. México D.F.: Instituto Nacional de Antropología.
- Boorstein, M. & Renneboog, R. (2013.). Earth science: Earth's weather, water, and atmosphere. Ipswich, Massachusetts: Salem Press, a division of EBSCO Publishing, 722 pp.
- Boyd, J. & Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The Need for Standardized Environmental Accounting. *Ecological Economics*, 63, 616-626.
- Brix, H. (1995). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status and future perspectives. *Water Sci. Technol.*, 30(8), 209-223.
- Brix, H. (1999). How 'green' are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems? *Water Sci. Technol.*, 40, 45-50.
- Brix, H., Koottatep, T., Fryd, o. & Laugesen, CH. (2011). The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi. System design and lessons learned during implementation and operation. *Ecological Engineering*, 37, 729-735.

- Brix, H., Koottatep. T. & Laugesen, CH. (2007). Wastewater treatment in tsunami affected areas of Thailand by constructed wetlands. *Water Sci Tech*, 56(3), 69-74.
- Calheiros, C., Bessa, V., Mesquita, R., Brix, H., Rangel, A. & Castro, P. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*, 79, 1-7.
- Carabias J.; Landa R.; Collado J. & Martínez P. (2005). Agua, Medio Ambiente y Sociedad. Hacia la Gestión Integral de Recursos Hídricos en México. UNAM. El Colegio de México. Fundación Gonzalo Río Arronte. México, D. F. 221 p
- Castañeda-Villanueva, A. & Flores-López, H. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *Paakat: Revista Tecnológica y Sociedad*, 3(5).
- CONAGUA (Comisión Nacional de Agua). (2010). Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- CONAGUA (Comisión Nacional de Agua). (2013). Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- CONAGUA (Comisión Nacional de Agua). (2016). Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Corcoran, E., Nellesmann, C., Baker, E., Bos, R., Osborn, D. & Savelli, H. (eds). (2010). Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, UN-HABITAT, GRID-Arendal.
- Crites, R., & G. Tchobanoglous. (1998). Small and Decentralized Wastewater Management Systems. Boston: McGraw-Hill.
- Chavez-Dagostino, M.R. & Andrade-Romo, E. (2012). Huella ecológica, desarrollo humano y turismo. En Ivanova, A. & Ibáñez, R. (coords.), Medio ambiente y

política turística en México Tomo I: Ecología, biodiversidad y desarrollo turístico (pp. 89-102). México, CDMX: SEMARNAT.

Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., & Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *International journal of hygiene and environmental health*, 214(6), 442-448.

Del Toro-Sánchez, C.L., Zurita, F., Gutiérrez-Lomelí, M., Solis-Sánchez, B., Wence-Chávez, L., Rodríguez-Sahagún, A.,... Siller-López, F. (2013). Modulation of antioxidant defense system after long-term arsenic exposure in *Zantedeschia aethiopica* and *Anemopsis californica*. *Ecotoxicology and Environmental*, 94, 67-72.

EPA (Environmental Protection Agency). (2004). *Constructed Treatment Wetlands*. Recuperado el 13 de abril de 2016 de <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30005UPS.PDF?Dockey=30005UPS.PDF>

EPA (Environmental Protection Agency). (1999). *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*. 346 pp,

Flowers, B. (2004). Domestic water conservation: greywater, rainwater, and other innovations. *Canadian Standards Council*.

Galindo-Zetina, M. (2012). Emisión de gases invernadero, remoción de contaminantes y crecimiento de plantas ornamentales en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales (Tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla. Puebla.

García-García, P. L., Ruelas-Monjardín, L. & Marín-Muñiz, J. L. (2016). Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico? *Water Policy* 18(3): 654-669.

García-Henche, B. (2005). Características diferenciales del producto turismo rural. *Cuadernos de Turismo, Universidad de Alcalá* (15), 113-133.

- García-Serrano, J. & Corzo-Hernández, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- Gauss, M. (2008). Constructed wetlands: a promising wastewater treatment system for small localities. Experiences from Latin America. Water and Sanitation Program. Washington, DC: World Bank.
- Ghermandi, A. & Fitchman, E. (2015). Cultural ecosystem services of multifunctional constructed treatment wetlands and waste stabilization ponds: Time to enter the mainstream? *Ecological Engineering*, 84, 615-623.
- González-Roblero, B. (2012). Eficiencia de un humedal artificial a escala piloto en el tratamiento de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro, Unidad Laguna. Torreón, Coahuila, México.
- Gopal, B. (1999). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. *Water Science and Technology* 40 (3): 27 – 35.
- Grattan, S.R., 2002. Irrigation Water Salinity and Crop Production. Publication 8066, University of California, Oakland.
- Groot, R., Wilson, M & Boumans, R. (2002). A Typology for the classification description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41(3), 393-408.
- Gross, A., Azulani, N., Oron, G., Ronen, Z., Arnold, M. & Nejidat, A. (2005). Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: a case study. *Water Science and Technology*, 52(8), 161-169.

- Hahn, H. P., Cless, K. & J. Soentgen eds. (2012). *People at the well: Kinds, usages and meanings of water in a global perspective*. Frankfurt, Germany: Campus Verlag.
- Hallack-Alegría, M., Payan-Ramos, J.C., Mungarray-Moctezuma, A., López-Lambraño, A., González-Duran, M., Castañón-Bautista, M.C. & Pérez-Baunet, M. (2015). Implementación y evaluación de un sistema de tratamiento de agua residual natural a través de humedales construidos en el noroeste de México. En Sastre-Merlín, A., Díaz-Carrión, I. & Ramírez-Hernández, J. (coords.), *Gestión de humedales españoles y mexicanos Apuesta conjunta por su futuro* (pp. 219-234). Alcalá: Universidad de Alcalá.
- Hartmann, D. L. (2016). *Global physical climatology*. Boston: Elsevier.
- Hastrup, K. (2009). Waterworlds. Framing the Question of Social Resilience. En Hastrup, K. (Ed.), *The Question of Resilience. Social Responses to Climate Change*. The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen pp. 11-30.
- Hernández, M. E. (2013). Ecological engineering for controlling water pollution in Latin America. Yáñez-Arancibia, A., Dávalos-Sotelo, R., Day, J. W. & Reyes, E. (eds). *Ecological Dimensions for Sustainable Socio Economic Development*. Wit Press, UK, pp. 465–481.
- Hernández, M.E. & Ruíz, P. (2010). Riparian constructed wetlands for improving water quality in a polluted river in Southeastern Mexico. En: *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering* (pp. 1-10). Québec, Canada.
- Hernández-Alarcón, M. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable (RINDERESU)*, 1 (2), 1-12.
- Hoffmann, H.; Platzer, C.; Winker, M.; Muench, E. von; GIZ (Editor). (2011). Technology Review of Constructed Wetlands. Subsurface Flow Constructed

Wetlands for Greywater and Domestic Wastewater Treatment. Eschborn: Deutsche Gesellschaft fuer Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Huhn, L., Deegener, S., Gamisonia, R. & Wendland, C. (2015). Greywater treatment in sand and gravel filters. Low Tech Solution for Sustainable Wastewater Management. Manual for Design, Construction, Operation and Maintenance. United Nations Environment Programme & Global Programme of Action.

Hutton, G., Haller, L. & Bartram, J. (2007). Global cost-benefit analysis of water supply and sanitation interventions. *Journal of Water and Health*, 5(4) ,481-502.

Ibáñez, R. & Ángeles, M. (2012). Indicadores de sustentabilidad turística. En Ivanova, A. & Ibáñez, R. (coords.), Medio ambiente y política turística en México Tomo I: Ecología, biodiversidad y desarrollo turístico (pp. 47-66). México, CDMX: SEMARNAT

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2012). México, Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado el 25 de noviembre de 2015 de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado el 8 de diciembre de 2016 de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/Default.aspx?t=mdemo13&s=est&c=17503>

Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, 157–164.

Kadlec, R. & S. Wallace. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group.

- Kadlec, R.H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 35(2), 159-179.
- Kadlec, R.H., Pries, J. & Lee, K. (2012). The Brighton treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 47, 56-70.
- Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, 16, 545-560.
- Knight, R.L., Walton, W.E., Omeara, G.F., Reisen, W.K. & Wass, R. (2003). Strategies for effective mosquito control in constructed treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 21, 211-232.
- Konnerup, D., Koottatep, T., Brix, H. (2009). Treatment of domestic wastewater in tropical subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. *Ecol. Eng.* 35 (2), 248-257.
- Krause, F., & Strang, V. (2016). Thinking relationships through water. *Society & Natural Resources*, 29 (6), 633-638.
- Lozán, J., Meyer, S. & Karbe, L. (2007): Water as the basis of life. En Lozán, J., Grassl, H., Hupfer, P., Menzel, L. & Schönwiese, C. Global Change: Enough water for all?. Hamburg, 19-25 pp.
- Ling, T.Y., Apun, K. & Zainuddin, S.R. (2009). Performance of a Pilot-Scale Biofilters and Constructed Wetland. *World Applied Sciences Journal*, 6(11), 1555-1562.
- Linton, J. & Budds, J. (2014). The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to wáter. *Geoforum*, 57, 170-180.
- Liu, S., Butler, D., Memon, F., Makropoulos, C., Avery, L., & Jefferson, B. (2010). Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system. *Water research*, 44, 267-277.

- López-Palomeque, F. (2001). El turismo en el desarrollo local y regional: aportaciones conceptuales. En Luzón, J. & Dantasle, L. (Ed.), *Desarrollo regional* (pp. 78-109). Barcelona: Medamérica
- López-Rivera, A., López-López, A., Vallejo-Rodríguez, R. & León-Becerril, E. (2015). Effect of the Organic Loading Rate in the Stillage Treatment in a Constructed Wetland with *Canna indica*. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 35 (2), 411-415.
- Luna-Pabello, V.M. & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17 (1), 32-55.
- Llagas-Chafloque, W. & Guadalupe-Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 15: 17 (85-96).
- Margalef, R. (1991). *Ecología*. Barcelona, España: Ed. Omega. 951 pp.
- Marín-Acosta, C., Solís-Silván, R., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. & Romellón-Cerino, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5 (10).
- Marín-Muñiz, J.L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. *Agroproductividad*, 10 (5), 90-95.
- Marín-Muñiz, J.L., Hernández-Alarcón, M. & Amaya-Tejada, S. (s/f). Removal of fluoride and chloride by horizontal-flow constructed wetland mesocosms with polyculture and monoculture ornamental plants. *Australian Journal of Rural Health* (Enviado). IF: 1.00.

- Martínez, P., Ramos, M.G. & Rodríguez, L.M. (2003). Humedales artificiales como alternativa para mejorar la calidad del agua. En III Encuentro de la Participación de la Mujer en la Ciencia. Universidad Autónoma Metropolitana, CDMX, México.
- Méndez-Mendoza, A., Bello-Mendoza, R., Herrera-López, D., Mejía-González, G. & Calixto-Romo, A. (2015). Performance of constructed wetlands with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of South Mexico. *Water Practice & Technology*, 10 (1), 110-123.
- Merino-Solís, M. & Cárdenas-Mijangos, J. (2008). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas y pluviales de las localidades ribereñas a la Laguna de Yuriria. En: V Congreso Internacional y XVI Congreso Nacional Ingeniería Bioquímica, VI Jornadas Científicas de Biomedicina y Biotecnología Molecular. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
- Merino-Solís, M., Villegas, E., De Anda, J. & López-López, A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: an anaerobic filter with a constructed wetland. *Water*, 7, 1149-1163.
- Millennium Ecosystem Assessment (MA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington, DC: Island Press.
- Mitch, W.J. & Gosselink, J.G. (2015). *Wetlands*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Mitsch, W.J. (2005). Wetland creation, restoration, and conservation: A Wetland Invitational at the Olentangy River Wetland Research Park. *Ecological Engineering*, 24, 243-251.
- Mitsch, W.J. (2014). Unifying a city with its natural riverine environment for the benefit of both: Extending Ohio's only wetland of international importance to a much larger river ecosystem corridor. *Ecological Engineering*, 72, 138-142.

- Mitsch, W.J., Cronk, J.K. & Zhang, L. (2014). Creating a living laboratory on a college campus for wetland research. The Olentangy River Wetland Research Park, 1991–2012. *Ecological Engineering*, 72, 1-10.
- Mitsch, W.J., Tejada, J., Nahlik, A., Kohlmann, B., Bernal, B & Hernández, C.B. (2008). Tropical wetlands for climate change research, water quality management and conservation education on a university campus in Costa Rica. *Ecological Engineering*, 34(4), 276-288.
- Morán, K. (1997). Compensación de las comunidades nativas por el descubrimiento de medicamentos: el trabajo de Healing Forest Conservancy. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 47(186), 56-69.
- Morel, A. & Diener, S. (2006). Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland.
- Navarro, A.E., García, Y., Vázquez, A. & Marrugo, J.L. (2012). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 4 (1), 39-50.
- Niño-Rodríguez, E.K. & Martínez-Medina, M.C. (2013). Estudio de las aguas grises domésticas en tres niveles socioeconómicos de la Ciudad de Bogotá (Tesis de Ingeniería). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Olguín, E.J., Sánchez, G., González, E., Domínguez, J.L., Hernández, V.J. & Castillo, O.S. (2014). The use of floating wetlands with *Cyperus papyrus* and *Pontederia sagittata* for the treatment of a polluted urban lake. En: *Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua* (pp. 45-47). Morelia, Michoacán, México.

- Olguín, E.J., Sánchez-Galván, G., González-Portela, R. & López-Vela, M. (2008). Constructed wetland mesocosms for the treatment of diluted sugarcane molasses stillage from ethanol production using *Pontederia sagittata*. *Water Research*, 4, 3659-3666.
- OMS (Organización Mundial de Salud). (2015). Informe 2015 del Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo (PCM): datos esenciales. Recuperado el 15 de noviembre de 2016, de http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/JMP-2015-keyfacts-es-rev.pdf
- OMT (Organización Mundial del Turismo). (2005). Indicadores de desarrollo sostenible para los destinos turísticos: guía práctica. Madrid, España. 545 pp.
- Orlove, B., & Caton, S. C. (2010). Water sustainability: Anthropological approaches and prospects. *Annual Review of Anthropology*, 39, 401–415.
- Orozco, C.E., Cruz, A.M., Rodríguez, M.A. & Pohlan, A.J. (2006). Humedal subsuperficial de flujo vertical como sistema de depuración terciaria en el proceso de beneficiado de café. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 6, 190-196.
- Ortiz-Moreno, J., Masera-Cerutti, O. & Fuentes-Gutiérrez, A. (2014). La ecotecnología en México. UNAM, México, 128 p.
- Otterpohl, R., Braun, U. & Oldenburg, M. (2013). Innovative technologies for decentralised water-wastewater and biowaste management in urban and peri-urban areas. *Water Science Technology*, 48(11), 23-32.
- Oviedo, G., L. Maffi, & P. Larsen. 2000. Indigenous and traditional peoples of the world ecoregion conservation. An integrated approach to conserving the world's biological and cultural diversity. Gland, Suiza: World Wide Fund for Nature.

- Pastor-Alfonso, M.J. (2003). El patrimonio cultural como opción turística. *Horizontes antropológicos*, 9(2), 97-115.
- Penn, R., Hadarib, M. & Friedler, E. (2011). Evaluation of the effects of greywater reuse on domestic wastewater quality and quantity. *Urban Water Journal*, 9(3), 137-148.
- Perevochtchikova, M. & Vasquez, A. (2012). The federal program of payment for hydrological environmental services as an alternative instrument for integrated water resources management in Mexico City. *The Open Geography Journal*, 5, 35-46.
- Pérez-Ramírez, C., Zizumbo, L. & González-Vera, M. (2009). Impacto ambiental del turismo en áreas naturales protegidas; procedimiento metodológico para el análisis en el Parque Estatal El Ocotil, México. *El Periplo Sustentable*, 16, 25-56.
- Pisanty, I., M. Mazari & E. Ezcurra (2009). El reto de la conservación de la biodiversidad en zonas urbanas y periurbanas. En *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pp. 719-759.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2017). La ley al servicio de la naturaleza. Impacto de desarrollos turísticos. Recuperado el 30 de agosto de 2017 de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/430/1/mx/impacto_de_desarrollos_turisticos.html
- Prüss-Ustün, A., Bartram, J., Clasen, T., Colford, J. M., Cumming, O., Curtis, V.,... Cairncross, S. (2014). Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene in low- and middle-income settings: a retrospective analysis of data from 145 countries. *Tropical Medicine & International Health*, 19(8), 894–905.

- Quintero-Santos, J. (2004). Impactos económicos, socioculturales y medioambientales del turismo vinculados con el turismo sostenible. *Anales del Museo de América*, 12, 263-274.
- Rámirez-Carrillo, H.F., Luna-Pabello, V.M. & Arredondo-Figueroa, J.L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8 (1), 93-99.
- Ripl, W. (1995). Management of Water Cycle and Energy Flow for Ecosystem Control: The Energy-Transport Reaction (ETR) Model. *Ecological Modelling*, 78, 61-76.
- Rivas, A., Barceló-Quintal, I. & Moeller, G.E. (2011). Pollutant removal in a multi-stage municipal wastewater treatment system comprised of constructed wetlands and a maturation pond, in a temperate climate. *Water Science & Technology*, 64 (4), 980-987.
- Rodríguez-González, A.I. (2013). El uso de humedales como una manera efectiva de disminuir los efectos ambientales por los residuos de una unidad de producción trufícola con sistema de recirculación: El Zarco, Estado de México (tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E. & Ortiz-Hernández, M.L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25 (3), 167-167.
- Schwarzenbach, R., Egli, T., Hofstetter, T., Gunten, U. & Wehrli, B. (2010). "Global water pollution and human health." *Annual Review of Environment and Resources* 35: 109–136.

- SECTUR (Secretaria de Turismo). (2006). El turismo de naturaleza: retos y oportunidades. México, CDMX.
- SECTUR (Secretaria de Turismo) (2007). Elementos para evaluar el impacto economico, social y ambiental del turismo de naturaleza en México. México, CDMX.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2012). Manual de Mejores Prácticas del Ecoturismo con base en la NMX-AA-133-SCFI-2006. México: SEMARNAT.
- Semeraro, T., Giannuzia, C., Beccarisib, L., Aretanoa, R. & De Marco, A.,... Petrosillo, I. (2015). A constructed treatment wetland as an opportunity to enhance biodiversity and ecosystem services. *Ecological Engineering*, 82, 517-526.
- Silva, J., Torres, P. & Madera, C. (2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359.
- Solano, M.L., Soriano, P., & Ciria, M.P. (2004). Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. *Biosystems Engineering*, 87, 109–118.
- Solís-Silván, R., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R., Hernández-Barajas, J. & Romellón-Cerino, M. (2015). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41 (1), 40-47.
- Steinhardt, U. & Volk, M. (2002). An investigation of water and matter balance on the meso-landscape scale: A hierarchical approach for landscape research. *Landscape Ecology*, 17, 1- 12.
- Stottmeister, U., Wiessner, A., Kuschik, P., Kappelmeyer, U., Kastner, M., Bederski, O., Mueller & R.A., Moormann, H. (2003). Effects of plants and

microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment, *Biotechnol. Adv.* 22: 93-117.

Tanner, C.C., Kadlec, R.H., Gibbs, M.M., Sukias, J.P. & Nguyen, M.L. (2002). Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands: influence of wastewater characteristics. *Ecological Engineering*, 18, 499-520.

Tanner, C.C., Sukias, J.P.S., Headley, T.R., Yates, C.R., Stott, R. (2012). Constructed wetlands and denitrifying bioreactors for on-site and decentralized wastewater treatment: comparison of five alternative configurations. *Ecological Engineering*, 42, 112–123.

Tejeda, M., López, Z & Zurita, F. (2014). Comparación de la eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina; resultados preliminares. En: Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua (pp. 1-5). Morelia, Michoacán, México.

Toledo, A. (2006). Agua, hombre y paisaje. SEMARNAT, México, CDMX, 253 p.

UNEP (United Nations Environmental Programme). (2007). Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Manual. United Nations Environmental Programme International Environmental Technology Center (UNEP-IETC) and the Danish International Development Agency (Danida).

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (2016). Convención sobre la protección del patrimonio mundial, natural y cultural. París.

UN-HABITAT (United Nations Human Settlements Programme) (2008). Constructed Wetlands Manual. UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme Nepal, Kathmandu

Unión Europea. (2012). ¿Tú Beberías tus aguas residuales? Recuperado el 24 de noviembre de 2016 de http://ec.europa.eu/environment/pubs/children/pdf/waste_water/es.pdf

UN-WATER (United Nations Water). (2015). Wastewater Management. A UN-Water Analytical Brief. Recuperado el 12 de diciembre de 2016 de <http://www.unwater.org/publications/wastewater-management-un-water-analytical-brief/>

Vera-Rebolledo, J., López-Palomite, F., Marchena-Gómez, M. & Anton-Clavé, S. (2013). Análisis territorial del turismo y planificación de destino turísticos. Valencia, España: Tirant Humanidades.

Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2, 530-549.

Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 20, 133–156.

Whitney, D., Rossman, A. & Hayden, N. (2003). Evaluating an existing subsurface flow constructed wetland in Akumal, Mexico. *Ecological Engineering*, 20, 105-111.

Wompner, F. & Montt, F. (2007). “Aprender a aprender. Un método valioso para la educación superior. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 72.

Wu, F.Y., Chung, A.K.C., Tam, N.F.Y. & Wong, M.H. (2012). Root exudates of wetland plants influenced by nutrient status and types of plant cultivation. *Int. J. Phytoremediation*, 14 (6), 543–553.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO.

- Xiaoping, L., Manman, C. & Anderson, B.C. (2009). Design and performance of a water quality treatment wetland in a public park in Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 35, 18-24.
- Zhang, D.Q., Jinadasa, K.B., Gersberg, R., Liu, Y., Ng, W.J. & Tan, S.K. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries - A review of recent developments (2000-2013). *Journal of Environmental Management*, 141, 116-131.
- Zurita, F., Bautista, J.P., Ramírez, A.A., Cornejo, O.M. & Ramírez, W. (2014). Humedales subsuperficiales de flujo horizontal plantados con *Zantedeschia aethiopica* e *Iris sibirica* para la remoción de arsénico de aguas para consumo humano. En: Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua (pp. 126-128). Morelia, Michoacán, México.
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 139-150.
- Zurita, F., De Anda, J. & Belmont, M. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Quality Research Journal of Canada*, 41 (4), 410-417.
- 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. *Ecological Engineering*, 35, 861–869.
- Zurita, F., Roy, E.D. & White, J.R. (2012) Municipal wastewater treatment in Mexico: current status and opportunities for employing ecological treatment systems, *Environmental Technology*, 33 (10) 1151-1158.

Zurita, F., Rojas-Bravo, D., Carreón-Álvarez, A. & Gutiérrez-Lomelí, M. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*, 40 (6), 409-415.

Zurita, F. & White, J. (2014). Comparative study of three two-stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries. *Water*, 6, 213-2.

ANEXO 1. Encuesta del taller de diseño de humedales



Maestría



ENCUESTA DE EVALUACIÓN DEL TALLER DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

I. DATOS PERSONALES

Genero:

Edad:

Lugar de trabajo o estudio:

Procedencia:

II. CONTENIDO

2.2. ¿Qué tanto conocía acerca del impacto de las aguas residuales?

Mucho

Poco

Nada

2.3. ¿Tenía conocimiento de la existencia de medios naturales para tratar agua? Si es así ¿cuáles?

2.4. ¿Considera que el costo de un Humedal Artificial es elevado?

2.5. En caso de que usted tuviera la oportunidad de implementar humedales artificiales en una localidad ¿Qué opción prefiere?

a) Un humedal a gran escala para la comunidad

b) Humedales pequeños por hogar

c) Algunos humedales estratégicamente ubicados por colonia o grupo de casas

2.6. Consideras que la utilización de plantas ornamentales en estos sistemas puede ser:

- a) Un negocio redituable
- b) Un extra meramente estético
- c) ambas

III. APLICABILIDAD

3.1. Indique el aprendizaje más significativo alcanzado por usted en el taller.

3.2. ¿Lo que ha aprendido es aplicable en su vida cotidiana o en su trabajo?

Totalmente Parcialmente Escasamente

3.3. A partir de lo aprendido en el taller, indique un cambio que espera incorporar en su vida cotidiana o laboral.

IV. EXPECTATIVAS

3.1. ¿Hasta qué punto el taller ha cumplido con sus expectativas?

Totalmente Parcialmente Escasamente

3.2. ¿Recomendaría usted este taller a otras personas? (Indicar el por qué en cualquier respuesta)

3.3. ¿Modificaría algún (os) aspecto (s) del taller?

3.4. ¿En general, qué calificativo puede dar al taller?

Excelente

Satisfactorio

No satisfactorio

Comentarios:
