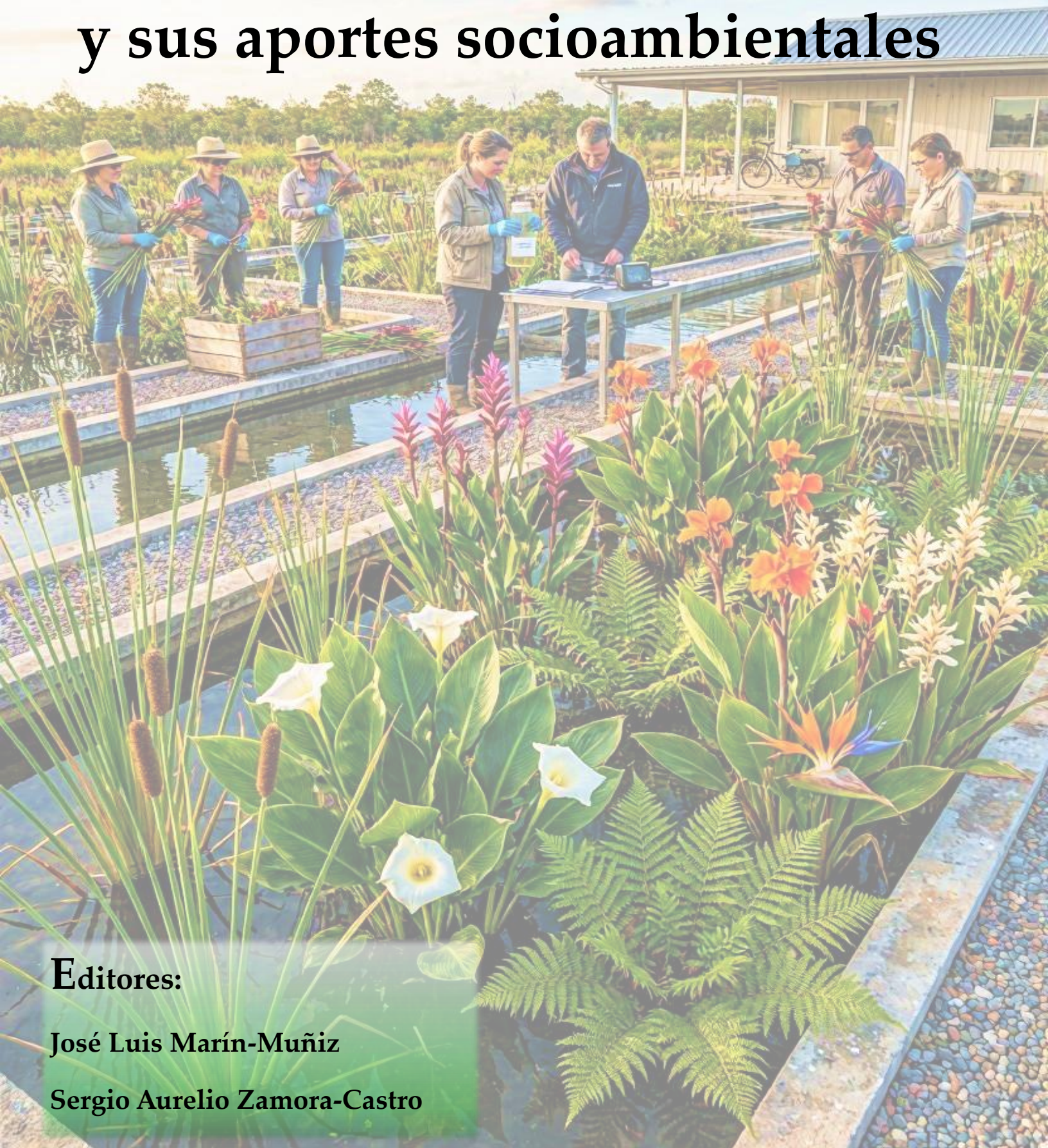


Los humedales de tratamiento y sus aportes socioambientales



Editores:

José Luis Marín-Muñiz

Sergio Aurelio Zamora-Castro

Los humedales de tratamiento y sus aportes socioambientales

Información Legal

Los humedales de tratamiento y sus aportes socioambientales, <https://citt.itsm.edu.mx/editorial/> es una publicación especial editada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Colonia Centro, Misantla, Veracruz, México. C.P. 93850. Página web <https://misantla.tecnm.mx/>

Esta obra ha sido dictaminada y aprobada bajo el arbitraje estricto por pares evaluadores (doble ciego), garantizando cumplimiento de los estándares de calidad del Sistema Nacional de Publicaciones Científicas y Humanísticas (SNPCyH) de la SECIHTI.

El contenido de cada capítulo es responsabilidad de los autores que lo firman y no representan la postura oficial del Instituto Tecnológico Superior de Misantla ni del Comité Editorial.

Copyright: Se autoriza la reproducción parcial o total sin fines de lucro de acuerdo con la licencia Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>, citando a los autores de la siguiente manera:

Marín-Muñiz, J.L., Zamora-Castro, S.A. (Eds.). (2026). Los humedales de tratamiento y sus aportes socioambientales. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Misantla. 280p.

D.R. © 2026 Primera Edición.

Sello Editorial Instituto Tecnológico Superior de Misantla: 978-607-9119 Agencia ISBN México.

ISBN-e: 978-607-9119-04-1

Formato: pdf

Editores / Coordinadores:

Dr. José Luis Marín-Muñiz

Academia de Ingeniería Ambiental. TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Dr. Sergio Aurelio Zamora-Castro

Facultad de Ingeniería, Construcción y Hábitat. Universidad Veracruzana

Diseño de interiores:

Dr. José Luis Marín-Muñiz, Dr. Sergio Aurelio Zamora-Castro

Diseño de portada:

Dr. José Luis Marín-Muñiz (con ayuda de IA Bing).

Directorio

**Tecnológico Nacional de México.
Instituto Tecnológico Superior de Misantla**

Directora General

Mtra. María Teresa Meza Caiceros

Director Académico

Mtro. Saúl Reyes Barajas

Director de Planeación y

Vinculación

Lic. Juan Antonio Hernández Morales

Subdirectora de Servicios

Administrativos

Lic. Reyna Villalva Velasco

**Subdirector de Posgrado e
Investigación**

Dr. José Luis Marín Muñiz

Subdirectora Académica

Mtra. Zita Monserrat Juárez Reyes

Subdirector de Planeación

Lic. José Edgar Soto Meneses

Subdirector de Vinculación

Dr. Federico Perera Zapata

Comité Editorial

Presidenta del Comité
Editorial y Representante Legal

Mtra. María Teresa Meza Caiceros
(Directora-General del ITSM)

Coordinador General
del Sello Editorial ITSM

Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas
(Coordinador del CITT)

Director de Edición, Diseño y
Publicaciones Digitales

Lic. Erik Balderas González

Administradora de Gestión Editorial

M.I.I. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Presidente del Comité Editorial
Científico

Dr. José Luis Marín Muñiz
(Subdirector de Posgrado e
Investigación)

Editores Asociados

Biología

Dr. Gustavo Martínez Castellanos

Biología

Dra. María Cristina López Méndez

Calidad y Sistemas de Manufactura

Dr. Gregorio Fernández Lambert

Calidad y Sistemas de Manufactura

Dr. Joel Pozos Osorio

Calidad y Sistemas de Manufactura

Dra. Yodaira Borroto Pentón

Ciencias Computacionales

Dr. Irahán Otoniel José Guzmán

Ciencias Computacionales

Dr. Eddy Sánchez de la Cruz

Gestión Educativa

Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta

Mecánica de Materiales

Dr. Pablo Julián López González

Medio Ambiente

Dr. Alan Antonio Rico Barragán

Tierra y Energía

Dr. David Reyes González

Comité Revisor

-TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Perote

Dr. Carlos Méndez Carreto

Dra. Fabiola Sandoval Salas

-Universidad Veracruzana

Dr. Irvin Uriel López Bonilla

Dr. Juan Antonio Triana-Tello

-Universidad Autónoma de Sinaloa

Dr. José Casimiro Zamora-Castro

- Bachilleres Veracruz Mixta

Dra. Monserrat Vidal Álvarez

-TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Mtra. Neira Sánchez Zárate

Dr. Pablo Julián López González

-Universidad de Sucre Colombia

Dr. Gaston Ballut Dajud

CONTENIDO

Introducción	8
--------------------	---

Eje temático 1: La sociedad y los humedales de tratamiento

1. **Teorías socioambientales y su influencia en la implementación de proyectos rurales tripartitas de agua y saneamiento con perspectiva de género**11
Irma Zitácuaro-Contreras, José Luis Marín-Muñiz, Sergio Aurelio Zamora-Castro
2. **Alianzas entre sociedad-gobierno-academia para promover soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales en Veracruz, México.....**28
Nelson Andrés Losada-Rodríguez, Aridai, Rivas-Hernández, José Luis Marín-Muñiz., Yulissa Rivas Hernández
3. **Experiencia educativa sobre los humedales construidos: Caso de estudio con alumnos de diferente nivel educativo, aplicado en San José Pastorías, Actopan, Veracruz**46
Aarón López-Roldán, José Luis Marín-Muñiz, Irma Zitácuaro-Contreras, Sergio Aurelio Zamora-Castro

Eje temático 2: Revisiones y análisis sobre el uso de humedales de tratamiento

1. **Los humedales de tratamiento en México, una mirada de su uso y funcionalidad para limpiar las aguas residuales y análisis de su aplicabilidad en el sector turístico**65
Raúl Castelán Cabañas, Roselia Servín Juárez, José Luis Marín-Muñiz, Juan Antonio Pérez Sato
2. **Posicionamiento global y tendencias técnicas de la investigación sobre humedales construidos: un análisis comparativo de México en el contexto internacional**100
Joaquín Sangabriel-Lomelí, Sergio Aurelio Zamora-Castro, Brenda Suemy Trujillo-García
3. **Panorama global de la investigación sobre humedales construidos con plantas ornamentales**127
Jazmín Alejandra Segovia Cano, José Luis Marín-Muñiz, Irma Zitácuaro-Contreras, Luis Carlos Sandoval Herazo, Graciela Elizabeth Nani González, Mayerlin Sandoval Herazo

Eje temático 3: Funcionalidad de los humedales de tratamiento y otras SbN: casos aplicados

1. **Efecto del tipo de sustrato sobre la remoción de contaminantes y crecimiento de plantas ornamentales en humedales a escala piloto en clima subtropical.**144
María Elizabeth Hernández Alarcón, Gerardo Lagunes Herrera
2. **Fitorremediación de aguas residuales con *Acrostichum danaeifolium* y *Thypha dominguensis* vía humedales artificiales**158
Gaspar López Ocaña, Rudy Solís Silván, David Guerreo Zarate, Roberto Rodríguez Bastarmérito, Carlos Alberto Torres Balcázar
3. **Wetland Agriaquaculture® sistema integrado de humedales construidos para producción agro acuícola en México: Diseño y operación**183
Elizabeth Delfín Portela, Erick Arturo Betanzo Torres, Luis Carlos Sandoval Herazo, David Reyes González, María de la Asunción Gurruchaga Rodríguez
4. **Soluciones basadas en la Naturaleza para la gestión sostenible del agua: implementación de una biopiscina en un centro ecoturístico de Jalcomulco, Veracruz, México.** 213
Diana Eliud Palacios Arriaga, Clementina Barrera Bernal.
5. **Tratamiento de lixiviados mediante humedales construidos bajo un enfoque de economía circular y su reúso en la producción de hortalizas**249
Erandy Saray Hernández Rivera, Georgina Martínez-Reséndiz, Graciela Elizabeth Nani González

Introducción

Este libro es el resultado de un amplio trabajo teórico y experimental sobre los humedales construidos o también llamados humedales de tratamiento, los cuales son tecnologías ecológicas o ecotecnologías que apoyan en mejorar la calidad del agua. Aunque el uso de los humedales para el tratamiento de aguas residuales ha sido ampliamente citado desde los años 50s en Europa y otros países extranjeros, en regiones tropicales como México su implementación ha sido principalmente en las últimas dos décadas, y a gran escala su aplicación se ha dado de manera parsimoniosa. Algunos obstáculos que han implicado la falta de réplica de estos sistemas han sido el desconocimiento sobre el tópico, falta de manuales de diseño y mantenimiento, e inexperiencia sobre lo que se está trabajando entre los científicos del país.

Derivado de lo anterior es que este libro surge como una opción práctica que conjunta conocimiento sobre los humedales de tratamiento. Este compendio incluye 11 capítulos que resultan de un trabajo de 31 diferentes autores, cuyo aporte está clasificado en tres principales capítulos o ejes temáticos. El primero de ellos **“La sociedad y los humedales de tratamiento”** cuyo principal aporte se alinea a trabajos que resaltan el papel crucial de la sociedad para el conocimiento sobre humedales construidos, las teorías que anteceden la implementación de tales sistemas de tratamiento y las alianzas que han propiciado avanzar en el uso de los humedales como una solución basada en la naturaleza para solventar la contaminación ambiental, pero que también requieren de reforzamiento para lograr avanzar en el problema global de contaminación hídrica.

En el eje 2, sobre **“Revisiones y análisis sobre el uso de humedales de tratamiento”**, se analizan mediante diferentes métodos de análisis de literatura, el uso de la ecotecnología a nivel mundial, resaltando lo que se ha hecho en México y en otros países para que se conozcan los diferentes diseños y propuestas sobre humedales en contextos similares y diferentes al de México, tanto para el sector turístico, municipal o global. Esta sección aborda la importancia global del uso de los diferentes tipos de humedales de tratamiento, dando énfasis a aquellos que utilizan plantas ornamentales en los humedales construidos.

Por otro lado, en el eje 3 se enmarcan los estudios sobre **“Funcionalidad de los humedales de tratamiento y otras SbN: casos aplicados”**, donde mediante cinco diferentes estudios se demuestra la utilidad de los humedales construidos y el uso de

biopiscinas en regiones tropicales de México, utilizando diferentes tipos de plantas y diseños que aportan al bienestar socioambiental y sin duda al logro de los objetivos del desarrollo sostenible, principalmente en su objetivo 6, agua limpia y saneamiento. Entre estos estudios se reporta la importancia de selección del sustrato, la vegetación o la adecuación de sistemas de humedales al sector agrícola y al sector industrial acuícola.

Por todo lo descrito, este libro tiene como objetivo fundamental promover los logros de la investigación científica en México al respecto del uso de los humedales construidos o de tratamiento. Así mismo, este compendio devela detalles de diseño, aprovechamiento, manejo y operatividad que pueden ser considerados en futuros trabajos de aplicación de estas alternativas de aporte sustentable, para mejorar la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales y apoyar en la adopción y apropiación de la ecotecnología.

Con la lectura de este amplio proyecto se entiende también como el uso de humedales de tratamiento implica un trabajo multidisciplinario y transdisciplinario. Estas investigaciones resultan de biólogos, ingenieros civiles, químicos, ambientales, arquitectos, científicos sociales y del área de ciencias atmosféricas, así como economistas y pedagogos. Deja claro que la preocupación por el cuidado ambiental une diferentes disciplinas y que es necesario trabajar en conjunto, pero también de la mano con la sociedad y el gobierno para lograr efectos positivos a largo plazo para el bienestar social y ambiental. Además, el visualizar este tipo de proyectos aplicados podría coadyuvar en el interés de replicabilidad de estas ecotecnologías ante los problemas de contaminación hídrica que se enfrentan en el país.

Eje temático 1:

La sociedad y los humedales de tratamiento

Teorías socioambientales y su influencia en la implementación de proyectos rurales tripartitas de agua y saneamiento con perspectiva de género

Socio environmental theories and their influence on the implementation of tripartite and gender sensitive rural projects

Irma Zitácuaro-Contreras, José Luis Marín-Muñiz, Sergio Aurelio Zamora-Castro

Resumen

El esquema de vida sedentario obligó a establecer conductas de aprovechamiento, explotación y almacenamiento de recursos para la existencia de las comunidades. Se da también una organización que administra los recursos naturales con la estructura de progreso y demanda, conllevando al deterioro, con esta base se plantea el objetivo de analizar las teorías socioambientales y su influencia en la implementación de proyectos rurales tripartitas y con perspectiva de género. Los resultados mostraron que existe una gran diversidad de teorías como son las libertades, la perspectiva de género, el ecofeminismo, entre otras. Sin embargo, debe existir la política pública que fortalezca la operatividad, para llegar a la praxis, en México se da a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y bajo Reglas de operación que puntualizan las aportaciones máximas federales. La importancia para la sustentabilidad es que se permite la construcción de proyectos no convencionales, como es la captación de agua de lluvia y el saneamiento básico a nivel domiciliario, mismos que tienen aportación federal de hasta un 80% del costo de los proyectos.

Palabras clave: Teorías sociales, teorías ambientales, sociedad, gobierno, participación social.

Abstract

Sedentary livelihood patterns have compelled rural communities to develop specific routines for natural resource utilization, exploitation and storage to sustain human existence. Resource governing organizational frameworks oriented toward developmental progress and market demand may drive environmental degradation. Against this backdrop, this paper aims to analyze socio environmental theories and their impacts on the implementation of tripartite rural projects incorporating a gender sensitive perspective. The findings reveal a broad spectrum of relevant theoretical

frameworks, including liberty centred theories, the gender perspective, and ecofeminism, among others. Nevertheless, robust public policy instruments are required to strengthen operational capacity and translate theoretical constructs into practical praxis. In the Mexican context, such policy frameworks are administered by the National Water Commission (Comisión Nacional del Agua, CONAGUA), guided by operating rules that stipulate maximum federal financial contributions. For advancing sustainability goals, priority should be given to developing non-conventional interventions such as household scale rainwater harvesting infrastructure and basic sanitation facilities, for which federal funding may cover up to 80% of total project costs.

Key words: Social theories, environmental theories, society, government, social participation.

Introducción

El aprovechamiento de los recursos naturales que hacen los humanos tiene la misma existencia que la humanidad misma, por ser seres heterótrofos, se necesita consumir la energía que otros seres vivos producen, como son las plantas y los animales. Esta energía proviene en gran parte de las plantas, mismas que por medio de la fotosíntesis transforman la luz solar en energía (Ávila-Bello, 2010). Este autor documenta que, el inicio de las actividades humanas sedentarias da paso al aprovechamiento de los recursos naturales y a su administración bajo el esquema de tener reservas, conllevando a la acumulación, esto al descubrir las bondades de la tierra, la agricultura y la ganadería con una producción de excedentes agropecuarios y forestales destinada al mantenimiento y demandas de artesanos, comerciantes, funcionarios y otros. Años más tarde se satisfacen también las demandas de la industria y con ello mayor preocupación por la ostentabilidad de los humanos que los conduce a la demanda de servicios adicionales a los básicos (Jaramillo, 1995).

Los recursos naturales en México son un gran compromiso internacional, porque forman parte de la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural de la UNESCO, a partir del 16 de noviembre de 1972 con vigencia desde el 17 de diciembre de 1975. Esto le da a México la responsabilidad en la preservación y protección de sitios que, den belleza escénica, riqueza natural en sus ecosistemas, procesos biológicos y ecológicos con condiciones de manejo. Se cuenta con 35 bienes inscritos en la Lista del Patrimonio Mundial, de los cuales seis son naturales y dos más tienen componentes naturales (SEMARNAT, 2021).

Este compromiso, hace que sea de prioridad realizar acciones para dar atención a uno de los recursos naturales que es renovable, pero que los modos de vida hacen modificaciones en su distribución espacial y su calidad, lo que genera la búsqueda de nuevas fuentes de agua y con ello la explotación de cuencas y acuíferos. El análisis de las teorías que explican el desarrollo, con base en las formas de consumo, permitirá entender por qué este desarrollo ha conllevado a la explotación de recursos, así mismo, deben analizarse las políticas públicas direccionadas a atender la problemática del agua y su saneamiento.

Lo anterior conlleva a plantearse el objetivo de analizar las teorías socioambientales y su influencia en la implementación de proyectos rurales tripartitas de agua y saneamiento con perspectiva de género, para contribuir al desarrollo local sustentable en pequeñas localidades.

Teorías para el desarrollo con relación a los modos de vida

La revolución industrial marca un parteaguas en la demanda de recursos naturales utilizados como materia prima, esta estructura de producción se ha incrementado y en las décadas actuales han generado una problemática que mantiene a la humanidad en acertijos con difícil respuesta para frenar el deterioro ambiental y los eventos relacionados como lo es el cambio climático. Todo esto generado por una existencia frugal de los seres humanos, lo que ha dado origen a diversas teorías para explicar este proceder.

Las necesidades elementales para supervivencia de las especies en el planeta no generan el problema, más bien es la búsqueda de elevar el estatus, con las implicaciones del crecimiento económico sobre el bienestar de las especies. Asimismo, la búsqueda de estatus afecta la dinámica de la distribución del ingreso económico y en consecuencia la adquisición de bienes, si éstos son ostentosos son consumidos principalmente por los agentes con mayor liquidez y las desigualdades sociales se intensifican mayormente (Jaramillo, 1995, Veblen, 2010). El establecimiento de las comunidades en las diferentes culturas a nivel internacional, hasta las pequeñas y grandes ciudades, han determinado la demanda de recursos naturales y con ello el deterioro y la necesidad de importar recursos de otras regiones.

Un segundo aspecto más que define la conducta humana es la clase ociosa analizada por Veblen (2000), quien expone que se vive de acuerdo con los cánones del decoro, donde lo ostentoso forma parte de los hábitos mentales, tanto en la vida diaria como es las actividades relacionadas con el desarrollo. Estos aspectos han retomado mayor

fuerza con el “desarrollo” de la revolución industrial, como es la moda al vestir, en las tendencias del tipo de hogar y la tecnología, entre otros, lo que implica gastos que no siempre satisfacen necesidades básicas (Veblen 2000; Ávila-Bello, 2010). El vestirse y calzarse a la moda es de los consumos que ponen en evidencia la definición de clases, su estado cambiante genera gasto económico, incluso al grado de privarse de algunas necesidades primarias y de una economía sana. Sin embargo, la moda tiene mayor éxito en las mujeres y los vestidos ostentosos se consideran de la clase ociosa (Veblen, 2000), lo que no aporta a la sustentabilidad.

Sin embargo, algunas otras teorías como el ecofeminismo, consideran que las mujeres, como administradoras de los recursos naturales en los hogares, son quienes tienen la sensibilidad y la conciencia de la preservación de los ecosistemas, asimismo, en la participación de la mujer en el desarrollo se han dejado de ver como receptoras pasivas, con el avance de las teorías sociales se ha logrado que se distingan como ejecutoras activas, con atribuciones en las agencias de las mujeres, como agentes de cambio y promotoras dinámicas de transformaciones sociales (Sen, 2000; Maya, 2003; Carcaño 2008), que revolucionan la vida, vista desde una perspectiva de género (Serret, 2020).

No obstante el avance de la industria, demandante de materia prima, las teorías sobre el desarrollo, los ecosistemas y la humanidad, surgen para favorecer un desarrollo más amigable con el entorno, varios autores (Left, 1998, Shi, et al., 2019), tratan de incorporar al medio ambiente al desarrollo económico, con la finalidad de entender las concepciones que conlleva el desarrollo y el crecimiento sin límite, así como tener los elementos para configurar una nueva racionalidad social que influya en la calidad de vida como fin último del desarrollo sustentable y del sentido de la existencia humana, a este concepto podríamos agregar, conviviendo en equilibrio con los recursos naturales, la sociedad y la economía de los países (Calva, 2007; ONU, 2015).

Left (1998), considera que, desde un punto de vista más científico, los nuevos paradigmas de la economía ecológica buscan integrar el proceso económico con la dinámica ecológica y poblacional y que la economía es concebida en base a las leyes de la termodinámica que rigen la degradación de la energía en todo proceso de producción y consumo, asimismo, que el sistema económico está inmerso dentro de un sistema físico-biológico más amplio, el cual le da soporte de sustentabilidad. Además, se trata de incorporar el medio ambiente al desarrollo económico, con la finalidad de entender las concepciones que conlleva el desarrollo y el crecimiento sin límite, así como tener los elementos para configurar una nueva racionalidad social que marque nuevos estilos de vida y disminución de brechas en la pobreza. Left (1998), trata desde varios puntos de vista a la sustentabilidad, considera que emerge

en el contexto de la globalización y cuestiona la racionalidad y los paradigmas teóricos que han impulsado el crecimiento económico. Se critica la racionalidad económica porque considera que desterró a la naturaleza del proceso de producción, generando destrucción y degradación ambiental. Se refiere al capitalismo por su gran impulso hacia el crecimiento, pero que es incapaz de detener la degradación entrópica que genera. En este contexto, la sustentabilidad ecológica aparece como un criterio normativo para la reconstrucción del orden económico, en beneficio de la sobrevivencia humana.

Ordenando ideas, se puede agregar que ante el empeoramiento de las amenazas al medio ambiente y sobre el florecimiento de las tendencias económicas y sociales, las privaciones deben observarse, tanto en los países ricos como en los pobres y la solución de la problemática es fundamental en el desarrollo sustentable. Para ello Sen (2000), documenta que se desempeñan los diferentes tipos de libertad en la lucha contra la problemática, estas libertades las clasifica en: libertades de oportunidades económicas, de políticas, de los servicios sociales, de las garantías de transparencia y de la seguridad protectora.

Perspectiva de género

Una incógnita importante en el desarrollo sustentable es el por qué se debe de considerar la perspectiva de género en la implementación de proyectos operativos y de gestión. En la década de los 70, en temas de mujer y desarrollo se incorporaron aspectos sociales, económicos y ambientales, ejes que la Agenda 2030 considera viables para un desarrollo sostenible (ONU, 2015). Se ha descrito el término como:

Se entiende la perspectiva de género como una mirada que pretende, primero, hacer visibles a las mujeres, sus actividades, espacios, lenguajes, interacciones, necesidades y problemáticas específicas, y segundo, dar cuenta de cómo opera en cada campo al que este enfoque se aplica, el orden de género como sistema de dominación (Serret, 2020, p. 36)

Otra fundamentación es que en la perspectiva de género se debe dar una participación igualitaria de hombres y mujeres. Lamas (1986), expone que al hablar de género se involucran las condiciones culturales y de los roles que asumen en sociedad hombres y mujeres y no a su condición biológica. La posición de la mujer es cultural y resultado de lo que en las comunidades se les etiqueta, variando de región a región. En la

definición expuesta por Serret (2020), género está referido a la mujer como una culturalidad de género femenino.

Sin embargo, debido a la diversidad de planteamientos y regionalización es importante mencionar que De la Cruz (1998), publicó una metodología en la que la perspectiva de género considera las diferencias existentes entre hombres y mujeres en políticas públicas. Este autor incorpora la perspectiva de género a los proyectos e investigaciones, mediante una guía para facilitar el análisis de los roles reproductivo, productivo y de gestión, donde se pueden identificar la vulnerabilidad por géneros aun cuando los actores no perciben esas carencias.

Además de considerar las condiciones, situaciones y necesidades de las mujeres y de los hombres, en las diferentes fases de los procesos de planificación sectoriales y en la ejecución de los programas y proyectos, así como de las políticas comunitarias. Otro fundamento lo expone en Mujer y medio ambiente (2008), donde se incluye el término y su condición en el medio rural, se expone que la propiedad de la tierra es un factor base para la conservación de la biodiversidad, por lo que se hace necesario el acceso de las mujeres a los programas, a la asistencia técnica y la capacitación. Las diferentes definiciones de perspectiva de género coinciden en que a las mujeres son elementos clave para su incorporación en las actividades operacionales y de gestión del desarrollo.

Ecofeminismo

Si una vez realizado el análisis de la vulnerabilidad de los géneros, fueran las mujeres quienes presentaran un mayor número de vulnerabilidades, bajo la teoría del feminismo se retoman acciones para la preservación de los recursos naturales, bajo el binomio mujer-medio ambiente. De acuerdo con Rico (1998), esta relación inicia en la década de los setenta y ha evolucionado incorporando el concepto de género, y como resultado surge el ecofeminismo. Carcaño (2008) y Puleo (2009), consideran que las mujeres manifiestan interés por preservar el medio ambiente por el rol que asumen en el hogar en el aprovechamiento los recursos naturales, por lo que se crea el cuidado de los recursos por medio de una perspectiva feminista, sin embargo, también es necesario participar en roles de gestión y poder en la toma de decisiones (Lamas, 1999; ONU, 2015). Serret (2020), también define a las mujeres con esencia maternal, cuidadoras, emotivas, intuitivas, solidarias, buscadoras de la paz y protectoras del equilibrio y la armonía medioambientales.

No todo es positivismo en la perspectiva de género cuando las mujeres se identifican con vulnerabilidades, se han expuesto divergencias y las mujeres se presentan como depredadoras porque hacen uso de recursos naturales de sus ecosistemas, asimismo, son víctimas del daño ambiental y por consecuencia tienen la potencialidad de la preservación (Serret, 2020). Adicionalmente, la evolución de las teorías de la mujer y medio ambiente, han incrementado su participación en el desarrollo. En Mujeres en el Desarrollo (MED) a Género en el Desarrollo (GED) se dan importantes avances al involucrar a las mujeres en relaciones de poder y de género para entender como debe ser la incorporación de las mujeres en el desarrollo (De la Cruz, 1998). Asimismo, con MED se avanza al incorporar a la mujer en roles productivos y en proyectos con estrategias direccionadas a la mujer.

Desarrollo rural sustentable como política pública en inversiones tripartitas

En materia de desarrollo sustentable, los países miembros de la ONU y en consecuencia toda su estructura se adhiere al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En general los 17 objetivos tienen atribuciones en localidades rurales, como lo son la disminución al hambre y la pobreza y al empoderamiento de las mujeres y las niñas (ONU, 2015), entre otros, Tabla 1. Sin embargo, la referencia directa al desarrollo local es el Objetivo 11, que contempla la iniciativa de que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. En este sentido se puede incluir a las localidades rurales, por lo que se debe gestionar el desarrollo con principios sustentables, donde los tres pilares (social, ambiental y económico) logren converger para lograr los objetivos a largo plazo.

El trabajo para lograr lo descrito no es fácil ni rápido, pero iniciarlo es una labor donde deben involucrarse autoridades locales, regionales y de toda índole, así como la sociedad en general y el sector académico que genere y aplique propuestas guiadas que apoyen a los logros. Todos deben ser tomadores de decisiones activos que permitan mantener las iniciativas.

Tabla 1. Políticas de desarrollo rural específicas y contenidas en la Agenda 2030.

Objetivo de la Agenda 2030	Meta
Objetivo 2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.	2.a Aumentar las inversiones en infraestructura rural, investigación y servicios de extensión agrícola, desarrollo tecnológico y bancos de genes de plantas y ganado a fin de mejorar la capacidad de producción agropecuaria en los países en desarrollo.
Objetivo 3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades	3.3 De aquí a 2030, poner fin a las enfermedades transmitidas por el agua y otras enfermedades transmisibles.
	3.9 De aquí a 2030, reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por contaminación del agua.
Objetivo 5. Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las Niñas.	5.5 Asegurar la participación plena y efectiva de las mujeres y la igualdad de oportunidades de liderazgo a todos los niveles decisorios en la vida política, económica y pública.
	5.c Aprobar y fortalecer políticas acertadas y leyes aplicables para promover la igualdad de género y el empoderamiento de todas las mujeres y las niñas a todos los niveles.
Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.	6.2 De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
	6.3 De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial
	6.6 De aquí a 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.
	6.b Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.
Objetivo 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.	11.a Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional.

Objetivo de la Agenda 2030	Meta
	11.b De aquí a 2020, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar, poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles
Declaración 7 Nuestra visión del futuro.	Un mundo en el que reafirmemos nuestros compromisos sobre el derecho humano al agua potable y al saneamiento, donde haya mejor higiene y los alimentos sean suficientes, inocuos, asequibles y nutritivos.
Declaración 33 de la nueva Agenda.	Reconocemos que el desarrollo social y económico depende de la gestión sostenible de los recursos naturales de nuestro planeta. Por ello, estamos decididos a preservar y utilizar sosteniblemente los océanos y los mares, los recursos de agua dulce y los bosques, las montañas y las zonas áridas, y a proteger la diversidad biológica, los ecosistemas y la flora y fauna silvestres.
Declaración 34 de la nueva Agenda.	La reducción y el reciclado de los desechos y un uso más eficiente del agua y la energía, y trabajaremos para minimizar el impacto de las ciudades en el sistema climático mundial.

Fuente: ONU, 2015.

Si bien puede manifestarse una relativa ausencia de estrategias a habilitarse en zonas rurales, la Agenda 2030 también se refiere a las iniciativas que se dirigen a los países menos desarrollados. En materia de saneamiento de los recursos hídricos, las localidades rurales pueden contribuir al desarrollo sustentable haciendo referencia a la Agenda 2030 (ONU, 2015).

En alineación a la estrategia mundial de desarrollo sustentable, el desarrollo rural y su gestión ha sido motivo de estudio y ocupación tanto de entes gubernamentales, académicos y sociales mediante asociaciones civiles como son los grupos organizados. En el rublo gubernamental, en México la legalidad es mediante la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, con observancia a nivel nacional y por la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001), reglamentaria de la Fracción XX del Artículo 27 mismo que menciona que:

“El Estado promoverá las condiciones para el desarrollo rural integral, con el propósito de generar empleo y garantizar a la población

campesina el bienestar y su participación e incorporación en el desarrollo nacional, y fomentará la actividad agropecuaria y forestal para el óptimo uso de la tierra, con obras de infraestructura, insumos, créditos, servicios de capacitación y asistencia técnica. Asimismo, expedirá la legislación reglamentaria para planear y organizar la producción agropecuaria, su industrialización y comercialización, considerándolas de interés público.

El desarrollo rural integral y sustentable a que se refiere el párrafo anterior, también tendrá entre sus fines que el Estado garantice el abasto suficiente y oportuno de los alimentos básicos que la ley establezca.” (Pág. 100-101)

Es observable que el desarrollo sustentable de las localidades de México tiene base fundamentada en la propia Constitución Mexicana, contando con la garantía del desarrollo integral y con la prestación de los servicios básicos, técnicos y financieros. Otro instrumento normativo que da los lineamientos para el desarrollo en México es la Ley de Planeación, sin embargo, no se documentan estrategias particulares, debido a que es general y aplicativa para todo el territorio mexicano. Sin embargo, derivado de esta Ley se elabora el Plan Nacional de Desarrollo y los Programas sectoriales por cada una de las Secretarías de Estado.

En Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2020-2024 (Presidencia de la República, 2019), es el documento rector del desarrollo nacional, por lo que es fundamental que se contengan las estrategias especiales para las localidades rurales partiendo de la base nacional, lo que se traduce a dar atención a 197 mil localidades donde residen más de 26 millones de personas (INEGI, 2023). El PND con vigencia al 2024, contiene para las zonas rurales el programa de Sembrando Vida como apoyo al campo, al establecimiento de normales rurales, construcción de caminos, así como el incentivar el uso de la bicicleta. Sin embargo, en alineación se construye el Programa Sectorial de Medio Ambiente y el Programa Nacional Hídrico (PNH) para la administración 2020-2024. Este último documento es normativo de la administración de los recursos hídricos en México y contiene los programas gubernamentales de apoyo. El documento contiene información desglosada para localidades rurales, donde existe una prestación del servicio de agua de apenas un 39%. En el Objetivo 1 del programa referente a “Garantizar progresivamente los derechos humanos al agua y al saneamiento, especialmente en la población más vulnerable”, se proponen estrategias y acciones puntuales, Tabla 2, indicando las responsabilidades, que pueden llegar a ser tripartitas, con acuerdo a las reglas de operación de los programas.

Adicionalmente, en otros objetivos se establecen estrategias direccionadas al fortalecimiento de los sistemas de agua para consumo humano. Si bien no todos se desglosan a nivel rural, se enlistan los que tienen atribuciones en el ámbito rural. Asimismo, se dan las acciones puntuales donde se fortalece la perspectiva de género y la atención a zonas rurales mediante programas dirigidos a pueblos indígenas y afroamericanos en el sector agua.

Tabla 2. Acciones puntuales, tipo de acción y dependencias responsables de acciones de agua y saneamiento.

Acción puntual	Tipo de Acción puntual	Dependencias responsables	Dependencia coordinadora
Objetivo 1. Garantizar progresivamente los derechos humanos al agua y al saneamiento, especialmente en la población más vulnerable.			
Estrategia prioritaria 1.2 Abatir el rezago en el acceso al agua potable y al saneamiento para elevar el bienestar en los medios rural y periurbano			
1.2.1 Reconocer y fortalecer a las organizaciones comunitarias de agua y saneamiento, en particular pueblos indígenas y afroamericanos, buscando la participación activa y paritaria de las mujeres.	Coordinación de la estrategia	CONAGUA, INMUJERES, INPI	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA
1.2.2 Promover la utilización de metodologías y tecnologías no convencionales.	Coordinación de la estrategia	IMTA, CONAGUA	
1.2.3 Fomentar la coordinación entre órdenes de gobierno para atender el acceso al agua y saneamiento en los centros educativos y de salud.	Coordinación de la estrategia	SEP, SALUD, CONAGUA	
Estrategia prioritaria 1.4 Atender los requerimientos de infraestructura hidráulica para hacer frente a las necesidades presentes y futuras.			
1.4.1 Identificar los requerimientos de infraestructura de agua potable, drenaje y tratamiento de aguas residuales en los centros de población.	Coordinación de la estrategia	SEDATU, CONAGUA	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA

Acción puntual	Tipo de Acción puntual	Dependencias responsables	Dependencia coordinadora
1.4.2 Programar la concesión y la asignación de agua para los proyectos regionales estratégicos.	Específica	CONAGUA	
1.4.3 Revisar, y en su caso concluir, los proyectos de agua potable y saneamiento en curso.	Específica	CONAGUA	
1.4.4 Impulsar el desarrollo de esquemas de coinversión entre programas presupuestarios de agua potable y saneamiento y las diversas fuentes de financiamiento.	Específica	CONAGUA	
Objetivo prioritario 2.- Aprovechar eficientemente el agua para contribuir al desarrollo sostenible de los sectores productivos.			
Estrategia prioritaria 2.1 Aprovechar eficientemente el agua en el sector agrícola para contribuir a la seguridad alimentaria y el bienestar.			
2.1.4 Fomentar el intercambio de agua en función de su calidad a fin de liberar volúmenes de agua de calidad para consumo humano u otros usos.	Coordinación de la estrategia	CONAGUA, SADER	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA
Estrategia prioritaria 2.4 Orientar el desarrollo de los sectores industrial y de servicios a fin de mitigar su impacto en los recursos hídricos.			
2.4.5 Promover que los proyectos de turismo contribuyan a mejorar los servicios de agua y saneamiento de comunidades aledañas.	Coordinación de la estrategia	CONAGUA, SECTUR	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA
Objetivo prioritario 3.- Reducir la vulnerabilidad de la población ante inundaciones y sequías, con énfasis en pueblos indígenas y afromexicanos.			
Estrategia prioritaria			
3.4 Fortalecer la atención de emergencias relacionadas con el agua para proteger a la población.			
3.4.4 Brindar servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, de manera emergente y temporal, en localidades afectadas	Coordinación de la estrategia	CONAGUA, SEDENA,	SEMAR 16 - Medio Ambiente y Recursos

Acción puntual	Tipo de Acción puntual	Dependencias responsables	Dependencia coordinadora
y reestablecer la provisión de agua en zonas productivas.			Naturales B00 - CONAGUA
Objetivo prioritario 4.- Preservar la integralidad del ciclo del agua a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos.			
Estrategia prioritaria 4.1 Conservar cuencas y acuíferos para mejorar la capacidad de provisión de servicios hidrológicos.			
4.1.2 Regular los sistemas de captación de agua de lluvia para evitar la afectación a terceros.	Específica	CONAGUA	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA
Objetivo prioritario 5.- Mejorar las condiciones para la gobernanza del agua a fin de fortalecer la toma de decisiones y combatir la corrupción.			
Estrategia prioritaria 5.1 Garantizar el acceso a la información para fortalecer el proceso de planeación y rendición de cuentas.			
5.2.3 Incorporar la igualdad sustantiva de mujeres y hombres, así como la representación de grupos vulnerables en los Consejos de Cuenca.	Coordinación de la estrategia	CONAGUA, INMUJERES e INPI	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA
Estrategia prioritaria 5.3 Fortalecer el sistema financiero del agua para focalizar inversiones a zonas y grupos de atención prioritaria, en particular pueblos indígenas y afromexicanos.			
5.3.1 Proponer la diversificación de fuentes de financiamiento y modernización de los sistemas tarifarios para garantizar los derechos humanos al agua y al saneamiento.	Específica	CONAGUA	16 - Medio Ambiente y Recursos Naturales B00 - CONAGUA
5.3.4 Redirigir subsidios e incentivos a regiones de atención prioritaria, en particular pueblos indígenas y afromexicanos.	Coordinación de la estrategia	CONAGUA e INPI	- CONAGUA
Estrategia prioritaria 5.4 Fortalecer las capacidades institucionales para la transformación del sector.			

Acción puntual	Tipo de Acción puntual	Dependencias responsables	Dependencia coordinadora
5.4.5 Capacitar a los servidores públicos para asumir una agenda de género y derechos humanos en el sector agua	Coordinación de la estrategia	INMUJERES, SEGOB, CONAGUA	Recursos Naturales B00 - CONAGUA
5.4.6 Fortalecer las capacidades de funcionarios para la atención de pueblos indígenas y afroamericanos en el sector agua	Coordinación de la estrategia INPI	CONAGUA	

INMUJERES (Instituto Nacional de las Mujeres); CONAGUA (Comisión Nacional del Agua); SEGOB (Secretaría de gobernación); INPI Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas), SEDENA (Secretaría de la Defensa Nacional); SECTUR (Secretaría de Turismo); SADER (Secretaría Agricultura y Desarrollo Rural); SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano); SEP (Secretaría de Educación Pública); IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).

Fuente. PNH 2020-2024

Las acciones consideradas se implementan con acuerdo en las Reglas de operación que establece el gobierno federal, “REGLAS de Operación del Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento (PROAGUA), a cargo de la Comisión Nacional del Agua, aplicables a partir de 2024”, siendo de observancia en los tres órdenes de gobierno y marcan las mezclas de recursos financieros que deben cumplirse acorde al tamaño de población, otorgando mayores beneficios a zonas rurales, pueblos indígenas y afroamericanos, Tabla 3.

El tipo de inversiones tripartitas se dan con relación a la asignación presupuestal de la federación, dada en la tabla, la mezcla de recursos restante se debe cubrir con inversiones del gobierno del estado o de los municipios, asimismo, para cumplir con la disposición de la Constitución Mexicana en su declaración de que el municipio tiene las atribuciones directas en el caso de la prestación de servicios de agua, alcantarillado y saneamiento.

Asimismo, las aportaciones federales serán aplicables al tipo de obra que se realiza, si es nueva tendrá mayor aportación y en los casos de rehabilitaciones y mejoramiento de la eficiencia solo será máximo un 50%.

Tabla 3. Porcentajes de aportaciones federales para localidades rurales.

Acciones de agua potable, alcantarillado y saneamiento	Porcentaje de aportación federal				Obras por cooperación
	Localidades con grado de prioridad de atención determinado por la CONAGUA.				
	Menores de 50	50 a 69	70 a 89	90 a 100	
Nuevo	50%	60%	70%	80%	80%
Rehabilitado		50%			n/a
Mejoramiento de la eficiencia		50%			n/a

En términos de sustentabilidad son de mayor valor las obras de abastecimiento de agua y saneamiento no convencionales, en este caso, las reglas de operación contienen que las acciones serán apoyadas con hasta el 80% de recursos federales. De aplicación específica para captación de agua de lluvia y saneamiento básico a nivel vivienda en zonas rurales.

Conclusiones

El deterioro ambiental es una realidad que se ha originado por las inapropiadas formas de vida de la humanidad, el estudio demostró que se conoce la realidad de las actividades antropogénicas, las consecuencias, así como los beneficios, pero también la contribución a la pérdida de los ecosistemas y sus beneficios ambientales. Con la conciencia generalizada, es difícil avanzar y traspasar las teorías a la praxis, sea por desconocimiento y más bien por dar preferencia a una vida ostentosa y de las comodidades que ofrecen las necesidades creadas. El estudio demostró que existe una gran diversidad de teorías que analizan las conductas consumistas que dan un estatus que hacen más grande la brecha de la pobreza y la desigualdad. Se hace necesario una transformación humanista con bases pedagógicas como lo expone Enrique Left en su libro de Saber Ambiental. Es una realidad que existe la necesidad y un cambio hacia estilos de vida sustentable, lo que es un aporte personal y social. Las atribuciones de las políticas públicas y de las instituciones gubernamentales han implementado iniciativas sustentables en los programas de gobierno, en México existe la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales con instancias propias en los estados y municipios, sin embargo, se torna difícil hacer lo necesario por al menos frenar el deterioro de los ecosistemas, una meta que la Agenda 2030, daba como solventada al año 2020 y estamos muy lejos de esa realidad. De la revisión de los programas

gubernamentales, en materia de agua y saneamiento existen en ambos casos un programa que incluye tecnologías alternativas como son la captación de agua de lluvia y sistemas de saneamiento básico. Ambos programas con poca respuesta por parte de los municipios, quienes tienen la atribución directa de la prestación de los servicios básicos en las localidades. La respuesta a toda esta gestión compleja es la participación y la voluntad gubernamental y social.

Referencias

- Ávila-Bello, C., H. (2010). La agricultura tradicional y la conservación de los recursos naturales en México. *Este país*, 46-50.
- Callicott, J. B., & Mumford, K. (1997). Ecological sustainability as a conservation concept. *Conservation biology*, 11(1), 32-40.
- Calva, J. L. (2007). Medio ambiente y desarrollo sustentable en México. *Sustentabilidad y desarrollo ambiental*, 17.
- Carcaño, V. E. (2008). Ecofeminismo y ambientalismo feminista: Una reflexión crítica. *Argumentos*, 21(56), 183-188.
- Jaramillo, F. (1995). Consumo ostentoso, crecimiento y distribución del ingreso. *Revista Desarrollo y Sociedad*, 1(36-37), 47-70. <https://doi.org/10.13043/dys.36-37.2>
- Lamas, M. (1986). La antropología feminista y la categoría género. *Nueva antropología*, 8 (30), 173-198.
- Leff, E. (2002). *Saber ambiental: sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. Siglo XXI.
- Ley 039 de 2001. *Ley de Desarrollo Rural Sustentable*. 7 de diciembre de 2001. DOF
- Maya, A., A. (2003). *La Diosa Nemesis. Desarrollo Sostenible o Cambio Cultural*. Colombia. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. 120 p.
- Mujer y Medio Ambiente. (2008). *Género y sustentabilidad: Reporte de la situación actual*, INMUJERES.
- Organización de las Naciones Unidas (2015). Resolución A/RES/70/1 *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
- Presidencia de la República. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2021). *Patrimonio natural de México, de importancia mundial*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/patrimonio-natural-de-mexico-de-importancia-mundial>
- Serret (2020). Feminismo. En: A. De Luca Zuria, E. J., Fosado Centeno, y M. Velázquez, *Feminismo socioambiental: revitalizando el debate desde América Latina*. (págs. 23-46). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Instituto Nacional de Información Estadística y Geográfica. (2023). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2022*. México. Gobierno de la República de México.
- Shi, L., Han, L., Yang, F., & Gao, L. (2019). The evolution of sustainable development theory: Types, goals, and research prospects. *Sustainability*, 11(24), 7158.
- Veblen, T. (2000). *Teoría de la clase ociosa*. Ediciones elaleph.com. 421 p.

Alianzas entre sociedad-gobierno-academia para promover soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales en Veracruz, México

Alliances between society government academia to promote nature-based solutions for wastewater treatment in Veracruz, Mexico

Nelson Andrés Losada-Rodríguez, Aridai Rivas-Hernández, José Luis Marín-Muñiz, Yulissa Rivas Hernández

Resumen

La adaptación al cambio climático ha generado la necesidad de establecer nuevas formas de cooperación y colaboración entre los distintos sectores y actores clave. En este contexto, las alianzas entre sociedad, gobierno y academia se convierten en una estrategia innovadora para unir esfuerzos y avanzar hacia el logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 17. Este estudio tiene como objetivo identificar las alianzas que han impulsado la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, como los humedales de tratamiento (HT), para el saneamiento de las aguas residuales en el estado de Veracruz, México. Los resultados muestran que, gracias a las alianzas entre la sociedad, el gobierno y la academia, se ha financiado e impulsado la construcción de once HT en el estado, para mejorar la calidad del agua, lo cual a la par ha dado como resultado beneficios sociales, ambientales y económicos. Se concluye que, esta triada de colaboración ha promovido la implementación y apropiación de los HT en las comunidades del estado de Veracruz.

Palabras clave: Humedales de tratamiento, aguas residuales, soluciones basadas en la naturaleza, colaboración, actores clave.

Abstract

Climate change adaptation demands innovative collaborative arrangements across diverse societal sectors and stakeholder groups. Multi actor alliances bridging civil society, governmental bodies and academic institutions constitute a promising collaborative mechanism to pool capacities and advance progress toward Sustainable Development Goal 17. This study identifies multi sector alliances that have facilitated the deployment of nature-based solutions — specifically treatment wetlands (TWs)

— for municipal wastewater remediation in the state of Veracruz, Mexico. Results demonstrate that society government academia partnerships have enabled the financing and establishment of eleven treatment wetland facilities across the state, delivering measurable social, environmental and economic co benefits. It is concluded that this tripartite collaborative model fosters both technical implementation and community appropriation of treatment wetland technology within rural and peri urban Veracruz communities.

Keywords: Treatment wetlands, wastewater, nature-based solutions, collaboration, key stakeholders.

Introducción

Aproximadamente el 80% de las aguas residuales en el mundo se vierten directamente al medio ambiente sin recibir ningún tipo de tratamiento previo, lo que representa una amenaza para la salud pública y el medio ambiente. Esta situación ha despertado el interés de los gobiernos y la comunidad internacional en buscar soluciones socialmente aceptables, ambientalmente sostenibles y económicamente viables para el tratamiento de las aguas residuales. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) emergen como estrategias innovadoras que aprovechan el enfoque basado en ecosistemas para afrontar de manera sostenible los desafíos socioambientales actuales. Los humedales de tratamiento (HT), conocidos también como humedales contruidos o humedales artificiales, son un ejemplo de SbN diseñados específicamente para el tratamiento de aguas residuales. Este tipo de sistemas ha demostrado efectividad para la remoción de contaminantes de hasta un 90% (Marín-Muñiz et al., 2023).

Los componentes principales de los HT son el sustrato, que funciona como soporte de las plantas y medio de filtración. Ejemplos de sustrato son la grava y la zeolita; un segundo componente son las plantas, las cuales se encargan de absorber y adsorber los nutrientes a través de las raíces. Ejemplos de plantas ornamentales más utilizadas en HT son *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis*, *Typha* sp., y *Scirpus* pp. (Marín-Muñiz et al., 2023); y como tercer componente los microorganismos, los cuales también se encargan de la descomposición y eliminación de contaminantes. La incorporación de plantas ornamentales aporta un valor estético y paisajístico al sistema, conservando su función fitorremediadora. En este ámbito, México se posiciona como uno de los países con mayor número de investigaciones sobre el uso

de plantas ornamentales en HT, las cuales son comunes en las regiones tropicales y se ha probado su funcionalidad como especies fitorremediadoras.

De acuerdo con estudios realizados por Marín-Muñoz et al. (2023), los plásticos reciclados, como el PET, son un sustrato alternativo común en los HT, utilizados como medio filtrante. Este estudio también identificó a la zeolita como el sustrato ideal para mayor eliminación de nitrógeno, lo cual pone en manifiesto el amplio uso de sustratos a utilizar según su cantidad en la región donde se instale la ecotecnología o según el costo de obtención de dichos materiales.

Los HT se clasifican en superficiales y subsuperficiales (Figura 1). Los HT superficiales se caracterizan porque el agua fluye por encima del sustrato, es decir, en contacto permanente con la atmósfera. La vegetación en estos HT se clasifica en flotante, cuando la planta no está anclada al sustrato y, como su nombre lo indica, permanece flotando sobre el agua (Figura 1a); emergente, cuando la planta está anclada al sustrato y sobresale del agua (Figura 1b); y sumergida, cuando la planta está anclada al sustrato y se encuentra bajo el agua (Figura 1c). Los HT subsuperficiales se caracterizan porque el agua fluye por debajo del sustrato. Estos se clasifican según la dirección del flujo del agua en horizontal y vertical. En el flujo horizontal, el agua se desplaza de un extremo al otro del HT, mientras que, en el flujo vertical, el agua fluye de arriba hacia abajo.

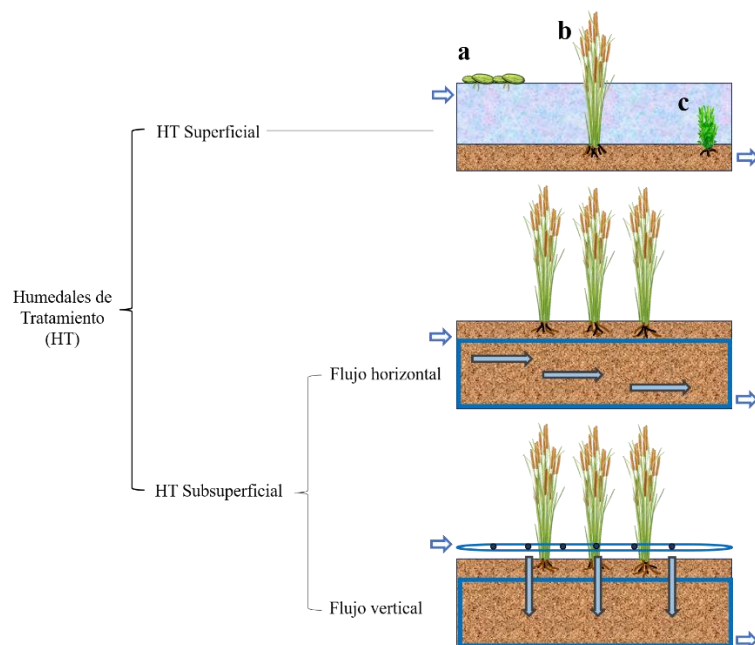


Figura 1. Clasificación de los humedales de tratamiento

El funcionamiento de los HT comienza con el almacenamiento de las aguas residuales en un tanque sedimentador (Figura 2a). Luego, el agua pasa por un pretratamiento o tratamiento primario, que consiste en la eliminación de sólidos mediante rejillas y de grasas mediante trampas (Figura 2b). Posteriormente, el agua se distribuye a través de tuberías a cada una de las celdas que conforman el HT. Una vez en cada celda, el agua fluye de forma horizontal o vertical y es tratada mediante procesos físicos, químicos y biológicos, gracias a la acción de las raíces de las plantas, el sustrato y los microorganismos (Figura 2c). Finalmente, el agua limpia sale por el otro extremo del HT a través de una tubería de cuello de ganso, ubicada externamente a unos 10 cm por debajo de la superficie del sustrato. Esta ubicación garantiza que el sistema permanezca permanentemente inundado. Luego, el agua se almacena en una celda para su posterior uso (Figura 2d). Según Portillo-Peralta et al. (2022), el agua tratada mediante HT puede ser utilizada para el riego de cultivos, evitado esta solo para productos tubérculos.

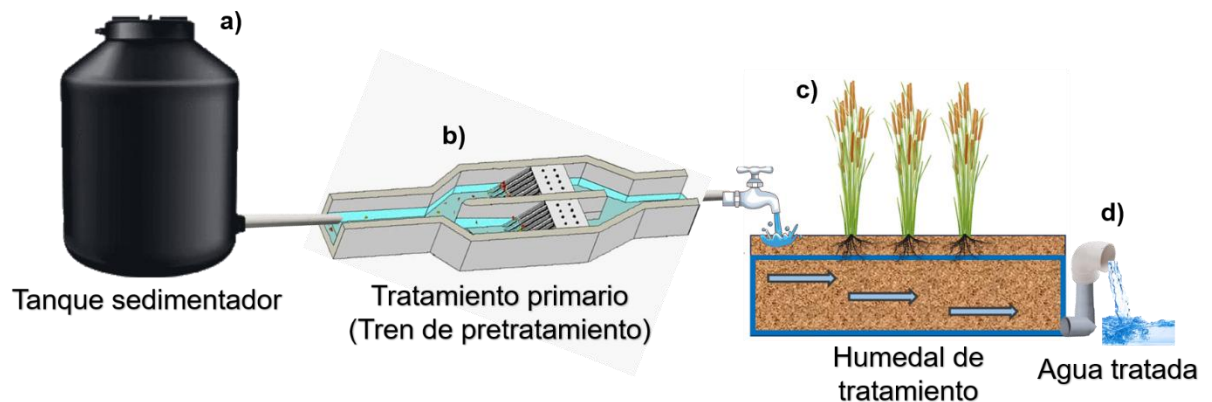


Figura 2. Funcionamiento general del HT subsuperficial con flujo horizontal
Fuente: Imagen b) recuperada de Belzona (2010). Tratamiento de aguas residuales.
Belzona Inc.

La implementación de los HT está ganando relevancia en la agenda ambiental global de los gobiernos, incluyendo a Estados Unidos, China y Alemania. Este enfoque se ve reflejado también a nivel local, como en México, específicamente en el Estado de Veracruz. Así pues, en el marco del Plan Veracruzano de Desarrollo, en su eje general “Bienestar Social” se establece la importancia de unir esfuerzos entre los distintos actores locales (Figura 3) para mejorar el medio ambiente, la calidad de vida, el

bienestar y el desarrollo humano de los veracruzanos. Esta perspectiva resalta la necesidad de colaboración entre gobierno, academia y sociedad civil, lo cual coincide con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 17 de la Agenda 2030. El ODS 17, conocido como "Alianzas para lograr los objetivos", destaca la importancia de establecer colaboraciones entre los distintos actores locales para garantizar un desarrollo sostenible en el que nadie se quede atrás.

De acuerdo con la Figura 3, la estructura de colaboración para la construcción y funcionamiento de HT a largo plazo se describe de la siguiente manera: la voluntad política del gobierno se manifiesta en la toma de decisiones y la asignación de recursos específicos para impulsar proyectos ambientales y sociales; la sociedad participa activamente a través de faenas comunitarias y reuniones para decidir sobre bienes de uso común, además de aportar capital social en la construcción, operación y mantenimiento de proyectos, como los HT. Finalmente, la academia contribuye con el diseño de propuestas, la implementación y seguimiento de proyectos y la generación de conocimiento.

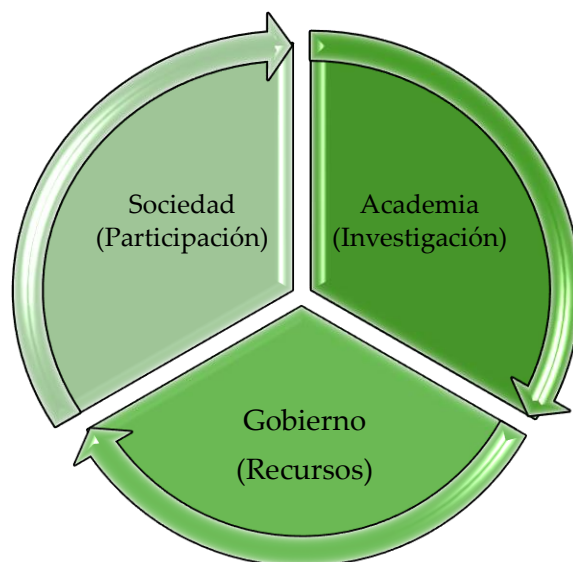


Figura 3. Triada de colaboración entre actores locales para la implementación de humedales de tratamiento

Estudios realizados por Palma-Cabrera et al. (2022) concluyen que, la colaboración entre el gobierno, la academia y la sociedad es indispensable para que los proyectos en las comunidades sean congruentes con las problemáticas locales. Estudios llevados a cabo por Magaña et al. (2011) mencionaron que, la adaptación al cambio climático implica nuevas formas de relación y colaboración entre la academia, gobierno y sociedad. Similarmente estudios realizados por Portillo-Peralta et al. (2022) en el estado de Veracruz, México, indican que, la colaboración entre el gobierno y la academia en los proyectos relacionados con los HT es necesaria para impulsar el interés de la comunidad y dar continuidad a los proyectos. En este sentido, el objetivo de este estudio es identificar las alianzas de colaboración entre la sociedad, el gobierno y la academia que han impulsado la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, como los HT, para el tratamiento de aguas residuales en las comunidades del estado de Veracruz, México.

Metodología

Región de estudio

El estado de Veracruz, oficialmente llamado Estado Libre y Soberano de Veracruz de Ignacio de la Llave, forma parte de las 31 entidades federativas que, junto con la Ciudad de México, conforman la República Mexicana (Figura 4). Su capital es el municipio de Xalapa-Enríquez. Tiene una extensión territorial de 71,823.5 km². Según el censo de población y vivienda de 2020, Veracruz reportó una población de 8,062,579 habitantes, con un 52% mujeres y un 48% hombres. El estado está dividido en 10 regiones: Huasteca alta, Huasteca baja, Totonaca, Nautla, Capital, Las Montañas, Sotavento, Papaloapan, Los Tuxtlas y Olmeca. Además, está conformado por un total de 212 municipios. Veracruz aporta el 4.6% al PIB Nacional, distribuido de la siguiente manera: un 63.6% en actividades terciarias, como servicios y comercio; un 31.0% en actividades secundarias, como minería, generación de energía, construcción e industria manufacturera; y un 5.4% en actividades primarias, como agricultura, cría y explotación de animales, pesca, caza y aprovechamiento forestal (Gobierno del Estado de Veracruz, 2019).

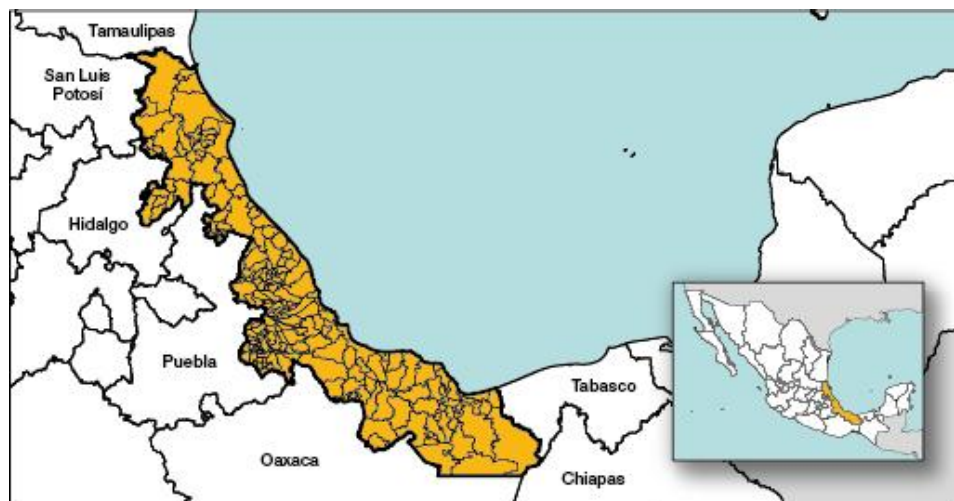


Figura 4. Ubicación geográfica del Estado de Veracruz

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2024)

Técnicas e instrumentos

Esta investigación tiene un diseño metodológico de enfoque cualitativo. Se utilizaron técnicas de revisión bibliográfica e investigación documental (Hernández Sampieri et al., 2014), respaldadas por el uso de fichas bibliográficas y tablas de síntesis para la recopilación y clasificación de la información. La revisión bibliográfica se enfocó en la búsqueda de literatura académica y científica para desarrollar el marco teórico, proporcionar antecedentes y fortalecer la discusión, utilizando bases de datos como Google Académico. Paralelamente, la investigación documental se dirigió a la recopilación de información sobre los HT en las páginas oficiales de la Secretaría de Medio Ambiente de Veracruz y el Gobierno del Estado de Veracruz.

Resultados y discusión

Inversión en "Soluciones basadas en la naturaleza" en el Estado de Veracruz

La Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz (SEDEMA), a través del programa "Proyectos para el Fomento Ambiental Veracruz" (PPFA), ha respaldado financieramente iniciativas destinadas a la conservación, restauración y adopción de prácticas sostenibles en el estado desde el año 2022. De estos proyectos, nueve han sido reportados para la implementación de HT en la región en los últimos tres años. Estos se han distribuido de la siguiente manera: dos proyectos apoyados en 2022, cinco en 2023 y dos en 2024. Igualmente, el Gobierno del Estado de Veracruz ha apoyado la implementación de dos HT en la región (Figura 5).

Instituciones de educación superior como El Colegio de Veracruz, el Tecnológico Nacional de México campus Misantla, Ver., la Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, entre otras, han colaborado en la implementación de HT a través del programa PPFA Veracruz. El aporte científico de estas instituciones comprende aspectos que van desde el diseño y la construcción, hasta la operación y el mantenimiento de esta SbN.

La participación de las comunidades locales también juega un papel muy importante en la materialización de los proyectos. Esto garantiza una apropiación y adopción exitosa del sistema de HT. La colaboración de las comunidades se ha manifestado de manera positiva, activa y masiva en cada uno de los territorios donde se han financiado proyectos, no solo de HT, sino de cualquier índole. Ejemplos de ello destacan los proyectos implementados en sitios de Veracruz como en San José Pastorías, Actopan, Palmas de Abajo, Actopan, San Marcos Atexquilapan, Naolinco, El Aguaje, Emiliano Zapata, Diaz Mirón, Misantla, entre otros. Con una importante participación comunitaria, que han favorecido el buen uso de la ecotecnología, así como una mejor calidad de vida.

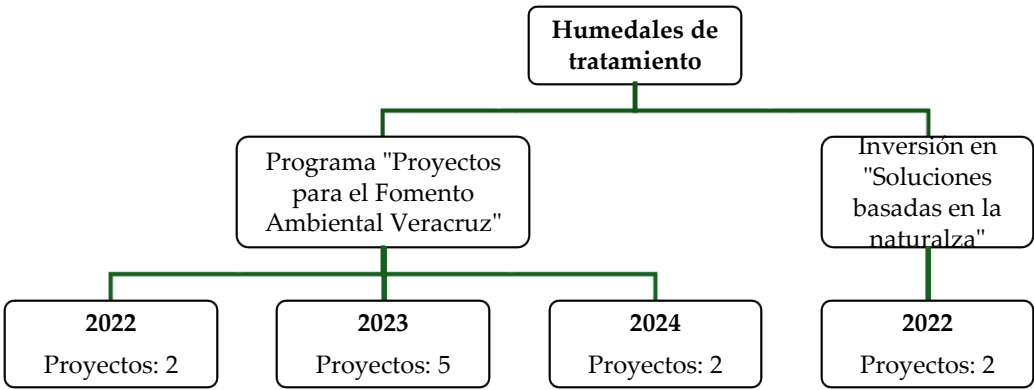


Figura 5. Proyectos de financiación de humedales de tratamiento

La implementación de HT ofrece beneficios sociales, ambientales y económicos en los lugares en donde se instalen. Dentro de los beneficios sociales, se encuentra la garantía de los derechos humanos a la disposición y saneamiento del agua, así como el derecho a gozar de un ambiente sano. Además, se incluye el acceso al agua tratada para su reutilización en labores domésticas y agrícolas, la disminución de problemáticas de salud pública y el fomento del desarrollo comunitario. En los beneficios ambientales, se incluye la mejora de la calidad del agua, la generación de servicios ambientales y la contribución a la mitigación del cambio climático. Por último, en los beneficios económicos, se encuentran la reducción de costos frente a la implementación de sistemas de tratamiento convencionales, la atracción del turismo

que puede generar ingresos para la comunidad, la creación de empleos locales y las artesanías derivadas de la materia prima que provee el sistema.

Inversión en "Soluciones basadas en la naturaleza" por parte de la Secretaría de Medio Ambiente de Veracruz

El programa PPFA ha respaldado y financiado varios proyectos de iniciativa socioambiental enfocados en la conservación, restauración y adopción de prácticas sostenibles en el estado. A continuación, se detallan los resultados de cada convocatoria por año.

Proyectos Financiados en 2022

En esta edición, se destinaron 8.7 millones de pesos para financiar 24 proyectos, de los cuales 10 fueron de restauración, 10 de prácticas sustentables y cuatro de conservación (Gobierno del Estado de Veracruz, 2022). En cuanto a los HT, dos proyectos resultaron beneficiados, estos se instalaron en San José Pastorías, Actopan, Ver., y en Díaz Mirón, Misantla (SEDEMA, 2022) (Figura 6). Para el primer proyecto, esta convocatoria financió la ampliación del sistema con el objetivo de tratar el 100% de las aguas residuales de la comunidad. Previamente, el sistema existente solo trataba cerca del 70% de las aguas residuales.



Figura 6. Humedales de tratamiento financiados en 2022.

Fuente: Sarmiento (2023)

Proyectos Financiados en 2023

En esta edición, se destinaron 9.4 millones de pesos para financiar 23 proyectos, de los cuales 13 fueron de prácticas sustentables, seis de restauración y cuatro de

conservación (Gobierno del Estado de Veracruz, 2022). En cuanto a los HT, cinco proyectos resultaron beneficiados, estos se instalaron en Zacatianguis, Platón Sánchez, Ver., Palmas de Abajo, Actopan, Ver., Martínez de la Torre, Ver., Yecuatla, Ver., y San Marcos Atexquilapan, Naolinco, Ver. (SEDEMA, 2023) (Figura 7).



Figura 7. Humedales de tratamiento financiados en 2023.

Fuente: Presidencia Municipal de Platón Sánchez (2024), Marín Muñiz (2024a), Velázquez Toral (2024), García (2024), SEDEMA (2024).

Proyectos financiados en 2024

En esta edición, se beneficiaron 23 proyectos. Al momento de escribir este artículo, no se disponía de información sobre el valor de financiación para los proyectos ni sobre su categorización (Gobierno del Estado de Veracruz, 2022). En cuanto a los HT, dos

proyectos resultaron beneficiados, estos se ubican en El Aguaje, Emiliano Zapata, Ver., y en Cuitláhuac, Ver. (SEDEMA, 2024). Para ambos sistemas el financiamiento fue de aproximadamente \$500,000.00 en cada uno de los casos. Los proyectos incluyeron sistemas de primarios de tratamiento y los humedales como sistemas secundarios (Figura 8).



El Aguaje, Emiliano Zapata, Ver.



Universidad Tecnológica Del Centro De Veracruz en
Cuitláhuac, Ver.

Figura 8. Humedales de tratamiento financiados en 2024.

Inversión en "Soluciones basadas en la naturaleza" por parte del Gobierno del Estado de Veracruz

De acuerdo con lo reportado en el cuarto informe de gobierno del estado, el Gobierno de Veracruz asignó una inversión en 2022 que ascendió a los 17.9 millones de pesos para el proyecto de construcción del Humedal Construido (HC) La Tortuga, en Nautla, Veracruz, beneficiando a más de nueve mil personas. Asimismo, destinó 7.7 millones de pesos para el rescate del río Naolinco mediante otro HC, el cual benefició a más de veintitrés mil personas (Figura 8) (Gobierno del Estado de Veracruz, 2022).



Figura 8. Humedales de tratamiento financiados en 2024.

Fuente: Laertes (2022), Hernández Ginés (2024), Marín-Muñiz (2024b).

El Gobernador del estado de Veracruz hasta el 2024, Ing. Cuitláhuac García Jiménez, resalta la eficiencia de remoción de contaminantes de los HT y su aporte a la descontaminación de los ríos (Andrade, 2024). Por otro lado, la Ing. Andrea K'arolina Hernández Ginés, subsecretaria de Cambio Climático y Gestión Ambiental de la SEDEMA en el mismo periodo, ha mencionado que los HT filtran y remueven contaminantes mediante el uso de vegetación como la *Typha domingensis* comúnmente conocida como Tule y la *Zantedeschia aethiopica* o comúnmente conocida con el nombre de Alcatraz. Además, destaca que este sistema es sencillo y de bajo costo, e incluso señala que puede implementarse en los hogares (Hernández Ginés, 2024). Finalmente, el Ing. Juan Carlos Contreras Bautista, secretario de la SEDEMA menciona que, los HT contribuyen a mitigar el impacto ambiental y tienen un efecto positivo en la mitigación del cambio climático (Contreras Bautista, 2023).

Participación de estudiantes en la implementación de humedales de tratamiento

Aquí se destacan dos instituciones de las que varios estudiantes han participado tanto en las etapas de construcción y monitoreo de humedales, así como en la difusión y estrategias de educación ambiental sobre la ecotecnología. En el caso de los estudiantes de El Colegio de Veracruz (COLVER), esta es una universidad pública de educación superior creada mediante decreto publicado en la Gaceta Oficial número 145 el 22 de julio de 2002. El COLVER, cuenta con varias academias, entre ellas, la de Desarrollo Regional Sustentable —de ahora en adelante, La Academia—. Esta academia es la responsable de formar profesionales con competencias teóricas, metodológicas e instrumentales para el diseño y evaluación de programas de desarrollo en los tres niveles de gobierno. En la actualidad, diez proyectos de investigación de La Academia se encuentran enfocados en los HT: dos proyectos llevados a cabo por posdoctorantes, dos por doctorantes y seis por maestrands. Estos

proyectos, abordan temas teórico-prácticos de los HT con perspectiva regional, enfocada en la solución de problemas públicos.

La Academia, ha aportado conocimiento científico a través de su equipo multidisciplinario conformado por profesores investigadores, posdoctorantes y estudiantes de posgrado en la implementación de HT en las comunidades del estado de Veracruz. Este equipo multidisciplinario es guiado, asesorado y encabezado por el Dr. José Luis Marín Muñiz, coordinador de La Academia del período 2023-2024. Algunos ejemplos de proyectos en los que el COLVER ha participado, destacan los HT implementados en: San José Pastorías y Palmas de Abajo, Actopan, Veracruz (Figura 9 y 10), San Marcos Atexquilapan en Naolinco, Veracruz, y Naolinco, Veracruz. Para la convocatoria del 2024, estará apoyando mediante sus investigadores en la construcción e implementación del HT en El Aguaje, Emiliano Zapata, Veracruz, México.



Figura 9. Estudiantes de posgrado COLVER en construcción de humedal de tratamiento en San José de Pastorías, Actopan, Veracruz.



Figura 10. Estudiantes de posgrado COLVER en construcción de humedal de tratamiento en Palmas de Abajo, Actopan, Veracruz.

Por otro lado, otro grupo de jóvenes altamente activo en las actividades sobre humedales y su divulgación han sido alumnos del Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM). Desde este sector estatal educativo y público se han implementado los humedales previamente descritos de Misantla, Platón Sánchez, Yecuatla y otros más. Además, en el ITSM cuentan con un Laboratorio sobre Sustentabilidad y Humedales a través del cual se ha impulsado el trabajo sobre dicha SbN, área liderada por el Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo hasta 2024. Actualmente desde esta institución ahora el Dr. José Luis Marín a partir del 2025 impulsa estas ecotecnologías donde ahora diseñan sistemas para el tratamiento de agua de la propia institución, a la par de seguir con la asesoría a las comunidades de Actopan y Emiliano Zapata, Veracruz, para el buen funcionamiento de los humedales. Desde esta área y desde la Subdirección de Posgrado e investigación se han impulsado conferencias y actividades de divulgación de la ciencia en el marco del día mundial de los humedales, como lo ejecutado en febrero 2025 en escuelas rurales de Actopan y Emiliano Zapata, Veracruz (Figura 11).



Figura 11. Estudiantes de posgrado (TecNM- Misantla) y SEDEMA en actividades divulgativas sobre humedales, en escuelas de El aguaje, Emiliano Zapata, Ver.

Conclusiones

- Las alianzas que han impulsado la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, como los HT en las comunidades del estado de Veracruz han involucrado a diferentes actores clave: la sociedad, representada por las comunidades de Actopan, Cuitláhuac, Emiliano Zapata, Martínez de la Torre, Misantla, Naolinco, Nautla, Platón Sánchez y Yecuatla; el gobierno, representado por la SEDEMA y el Gobierno del Estado de Veracruz; y la academia, representada por instituciones públicas de educación superior como El Colegio de Veracruz o el Instituto Tecnológico Superior de Misantla.
- Los HT están ganando popularidad a nivel mundial y local, convirtiéndose en una solución basada en la naturaleza para promover el desarrollo regional en el estado de Veracruz. El aumento del interés se atribuye a los beneficios sociales, ambientales y económicos que este sistema ofrece.
- El programa PPFA Veracruz, fomenta la colaboración entre los actores locales, incluyendo el gobierno, la sociedad civil y la academia, lo que contribuye directamente al logro del ODS 17. Esta colaboración fortalece la capacidad local para abordar los desafíos ambientales y promueve la participación activa de la comunidad en la implementación de soluciones sostenibles.
- Estos proyectos aumentan la conciencia y educación ambiental entre la población local, promoviendo una cultura de sostenibilidad y responsabilidad ambiental que puede perdurar a largo plazo.

- La voluntad política es crucial para la financiación e implementación de proyectos que beneficien al medio ambiente y a la sociedad, es importante destacar que en la actual administración (2018-2024), dicha voluntad ha permitido obtener el apoyo para varias investigaciones, las cuales reflejan la prioridad de los temas ambientales en la agenda política y en la disposición de los líderes a apoyar iniciativas sostenibles.
- La participación y el involucramiento de la sociedad en los proyectos de fomento ambiental promueve el desarrollo comunitario, la apropiación de los HT y fortalece el vínculo de la sociedad con la academia y el gobierno.
- La participación de la academia en los proyectos de fomento ambiental contribuye a la aplicación del conocimiento científico para abordar desafíos socioambientales.
- Dicha tríada de colaboración hace posible el éxito de estos programas, desde su origen hasta su ejecución, generando alianzas que pueden lograr un bien común, que abona a varios de los objetivos de la Agenda 2030

Referencias

- Andrade, C. (23 de enero de 2024). *Humedales y construcción de planta de fertilizantes para descontaminar río Naolinco: Cuitláhuac García*. MasNoticias RTV. <https://www.masnoticias.mx/humedales-y-construccion-de-planta-de-fertilizantes-para-descontaminar-río-naolinco-cuitlahuac-garcia/>
- Belzona (2010). *Tratamiento de aguas residuales*. Belzona Inc. https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf
- Contreras Bautista, J. C. [@IngenieroJuanCarlosContreras] (25 de diciembre de 2023). *Gracias a la disposición de nuestro Gobernador, el Ing. Cuitláhuac García Jiménez, y a través de los "Proyectos para el*. [Texto adjunto]. Facebook. <https://www.facebook.com/IngenieroJuanCarlosContreras/posts/pfbid02ioPexxRNRW5GMxrr4k4fh8NLRfYg9FNm9YmGsscK2orZwhmk2R2T5gDKdq4hREN11>
- García, A. (06 de febrero de 2024). *Ponen en marcha el proyecto del humedal en Yecuatla*. ElHeraldo. <https://elheraldodemartinez.com.mx/estado/misantla/117163-ponen-en-marcha-el-proyecto-del-humedal-en-yecuatla.html>
- Gobierno del Estado de Veracruz (2019). *Plan Veracruzano de Desarrollo 2019-2024*. <https://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2019/06/Plan-Veracruzano-Desarrollo-2019-2024.pdf>
- Gobierno del Estado de Veracruz (2022). *Cuarto informe de gobierno* [Tomo uno]. <https://www.veracruz.gob.mx/cuartoinformedegobierno/>

- Hernández Ginés, A. K. [@K'arolinaGinés] (01 de febrero de 2024). *Los humedales artificiales están transformando los cuerpos de agua de nuestro estado. Son una tecnología que permite el tratamiento de.* [Texto adjunto]. Facebook. https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=pfbid02Aba4rjBvX3mkF2T7ZrdvcjqynGYQMwQnRPLif64Wy6b28fh3iaMsBxKwn9D92fVBl&id=100093852591446
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México, DF: Mc Graw Hill.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2024). *Veracruz de Ignacio de la Llave* (30), *México en cifras*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30#collapse-Resumen>
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825198039>
- Laertes, J. (13 de julio de 2022). *Supervisa Cuitláhuac Planta de Tratamiento 'La Tortuga' en Nautla*. Loseditores.com. <https://loseditores.com/resumen/83948/-concluye-gobierno-del-estado-planta-de-tratamiento-la-tortuga-en-nautla>
- Magaña, V., Gómez, L., Neri, C., Landa, R., León, C., y Ávila, B. (2011). *Medidas de adaptación al cambio climático en humedales del Golfo de México*. INE, SEMARNAT, UNAM, BM, UAM. http://awsassets.panda.org/downloads/librohumedales_baja_julio2011.pdf
- Marín-Muñiz, J. L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., Álvarez-Hernández, L. M., Martínez-Aguilar, K. E., López-Roldán, A., y Zamora, S. (2023). Bibliometric Analysis of Constructed Wetlands with Ornamental Flowering Plants: The Importance of Green Technology. *Processes*, 11(4), 1253. <https://doi.org/10.3390/pr11041253>
- Marín Muñiz, L. J. (28 de febrero de 2024a). *Queda inaugurado el humedal de tratamiento de Palmas de Abajo Actopan. Un sistema que puede tratar hasta 9000 litros por hora.* [Imagen del humedal adjunta]. Facebook. <https://www.facebook.com/josue.marmuz/posts/pfbid02BuMweuhK8RJcPGrFJis8bHRagemyHTwTxCxPjSyGtQkPCiDC64zJQxUECt4wDRj3l>
- Marín Muñiz, L. J. (23 de enero de 2024b). *Ahora tocó trabajar en el humedal de Naolinco, ajuste de flujos de agua, monitoreos y otras consideraciones para el buen.* [Imagen del humedal adjunta]. Facebook. <https://www.facebook.com/photo?fbid=10161815285989095&set=pcb.10161815288059095>
- Palma-Cabrera, E. M., Marín-Muñiz, J. L., y Ruelas-Monjardín, L. C. (2022). Limitantes para la adopción de humedales artificiales: estudio de caso con perspectiva de género en Pastorías, Actopan, Veracruz. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 170-178. <https://doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5357>

- Portillo-Peralta, J. I., Marín-Muñoz, J. L., Pérez, M. D. C. C., y Zamora-Castro, S. A. (2022). Diagnóstico sobre el funcionamiento y la apropiación social de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales en pastorías, Actopan, Veracruz, México. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 162-169. <https://doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5356>
- Presidencia Municipal de Platón Sánchez [@PresidenciaPlatonSanchez] (02 de febrero de 2024). *Gracias a las gestiones realizadas por el Lic. Guilebaldo Flores López, presidente municipal constitucional del municipio de Platón Sánchez, Veracruz.* [Imagen del humedal adjunta]. Facebook. <https://www.facebook.com/PresidenciaPlatonSanchez/posts/pfbid029zJ5Lo8WygUBDG2c6QXzLzBQcNJc6z5nSoEQnPqvWab2qZCHnEpMFX5v4Hz3t8u vl>
- Sarmiento, J. (03 de febrero de 2023). *Construyen primer humedal artificial en comunidad de Misantla.* MasNoticias RTV. <https://www.masnoticias.mx/construyen-primer-humedal-artificial-en-comunidad-de-misantla/>
- Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz [SEDEMA] (2022). *Resultados de la convocatoria "Proyectos para el Fomento Ambiental 2022"*. SEDEMA. <http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2022/08/Resultados-Finales-Proyectos-2022.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz [SEDEMA] (2023). *Resultados de la convocatoria "Proyectos para el Fomento Ambiental 2023"*. SEDEMA. http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2023/09/Lista_Resultados_PFA_2023.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz [SEDEMA] (2024). *Resultados de la convocatoria "Proyectos para el Fomento Ambiental 2023"*. SEDEMA. https://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2024/05/Lista_Resultados_PFA_2024-27-mayo-2024-1.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente de Veracruz [@SEDEMAVeracruz] (29 de febrero de 2024). *Gracias al trabajo por un Veracruz sostenible, ahora la comunidad de San Marcos Atexquilapan, del municipio de Naolinco, tratará sus.* [Imagen del humedal adjunta]. Facebook. <https://www.facebook.com/SEDEMAVeracruz/posts/pfbid09b9GDpPMkddpEmA1TBtoKXbAdqoTnR4TKUnJ2r1NP1rfbKtSimfWjQW1SH2LU3DtI>
- Velázquez Toral, M. (02 de febrero de 2024). *Desde este momento ya podemos ir generando condiciones de vida sanas para las generaciones del futuro y una de esas.* [Imagen del humedal adjunta]. Facebook. <https://www.facebook.com/modedto.velazqueztoral/posts/pfbid02Upwdjitm9qe5wqjuPGch3fWz3xaLwiQQTsmKhNtjSybuPGNcY2Dqgask36BdBo87l>

Experiencia educativa sobre los humedales contruidos: Caso de estudio con alumnos de diferente nivel educativo, aplicado en San José Pastorías, Actopan, Veracruz

Educational experience regarding constructed wetlands: A case study involving students across multiple educational levels in San José Pastorías, Actopan, Veracruz

Aarón López-Roldán, José Luis Marín-Muñiz, Irma Zitácuaro-Contreras, Sergio Aurelio Zamora-Castro

Resumen

Este estudio presenta una experiencia didáctica que señala el proceso educativo que se realiza en la comunidad de San José Pastorías, Actopan, México con grupos de estudiantes de diversas edades. San José Pastorías es una zona rural donde el agua residual de la población es tratada mediante un humedal construido. Fueron seis las actividades educativas que abarcan el proceso educativo realizadas con los estudiantes para promover el conocimiento sobre el sistema de tratamiento de agua residual y sensibilizar sobre la importancia del cuidado ambiental. Con estos procesos educativos se busca que los estudiantes conozcan el funcionamiento, las ventajas y el aprovechamiento del uso del humedal construido como sistema de tratamiento de agua. Con las actividades se espera que los estudiantes mejoren sus conocimientos, coadyuve en la concientización ambiental enfocado a la importancia de mejorar la calidad del agua y a influir en los estudiantes sobre la importancia de estos sistemas sustentables. Se concluye que las seis etapas que se realizan para el proceso educativo son suficientes para que los estudiantes se lleven un aprendizaje significativo, ya que, por diferentes métodos y estrategias educativas los estudiantes conocieron los humedales contruidos, sus componentes, aprovechamiento, utilidad resolviendo problemas reales y sus aplicaciones. Es importante seguir disseminando estas estrategias de mitigación de los problemas de contaminación hídrica y fomentar la réplica de este tipo de actividades de experiencia sobre los humedales contruidos.

Palabras clave: Educación ambiental, Zona rural, Educación no formal, sistema de tratamiento de agua, ecotecnología

Abstract

This paper presents a didactic educational intervention implemented in the rural community of San José Pastorías (Actopan, Mexico), where local domestic wastewater is treated by a full scale constructed wetland. Six structured educational activities were delivered to student cohorts spanning diverse age ranges. The intervention sought to build participants' understanding of constructed wetland treatment workflows, functional advantages and practical applications, alongside raising environmental awareness regarding freshwater quality protection. Through mixed pedagogical approaches, students engaged with real world environmental challenges to examine system components, resource recovery opportunities and practical use cases of constructed wetland technology. Outcomes indicate that the six-stage educational programme generates meaningful student learning: participants acquired working knowledge of constructed wetland architecture, operational principles and practical utility. This work underscores the need for wider dissemination of such educational strategies to mitigate water pollution risks and support replication of experiential learning activities focused on constructed wetlands.

Key words: Environmental education, Rural areas, Nonformal education, Water treatment system, Ecotechnology

Introducción

El agua es un recurso indispensable para la vida, sin embargo, paulatinamente se ha deteriorado debido a la contaminación, es por ello que la implementación de sistemas de tratamiento de agua para mejorar su calidad es muy importante. Las aguas residuales son el resultado del uso del recurso hídrico de actividades humanas, y antes de ser vertidas a un cuerpo de agua estas deberían ser tratadas mediante procesos físicos, químicos y biológicos, sin embargo, un 80% de estas aguas a nivel mundial se descargan sin algún tratamiento previo (Aparicio Roque & Mogollon Vizuela, 2025).

Al no tratar el agua residual antes de que se descargue en un cuerpo de agua, genera que el espacio de agua se contamine paulatinamente afectando directamente a la biodiversidad aledaña y dentro del ecosistema. Existen diversos sistemas para tratar el agua. Uno de ellos son los humedales construidos, son ecotecnologías que se usan para eliminar contaminantes de las aguas residuales, y es considerada una solución basada en la naturaleza, dado que sus procesos son naturales e imitan lo que ocurre

en los ecosistemas de humedales naturales, donde mediante procesos físicos, químicos y biológicos se degradan los contaminantes a la par de que se produce vegetación y el agua tratada puede ser reutilizada para otros usos, todo ello permite mitigar el impacto ambiental de los ecosistemas acuáticos (Rodríguez Zuniga et al., 2025).

En sí estos sistemas consisten en celdas impermeables, superficiales cuando el agua está en contacto directo con la atmósfera, lo más parecido a una laguna o humedal natural. Y el otro tipo de humedales construidos son los de flujo subsuperficial, donde la celda es rellena de un sustrato poroso en el que se forman familias microbianas que coadyuvan en la remoción de elementos tanto orgánicos como inorgánicos. A la par de lo anterior, en ellos se siembra vegetación que se adapta a tener sus raíces en condiciones saturadas de aguas, por lo que se les conoce como hidrófitas. En dicha estrategia se resalta que los microorganismos, vegetación, sustrato y el agua son de los componentes básicos. Esta alternativa de tratamiento nace en Europa de los 60s-70s (Vymazal, 2022) y en México ya tiene cerca de tres décadas su aprovechamiento, aunque no en la mayoría de los casos a mayor escala, donde los humedales de flujo subsuperficial son los más replicados (Marín-Muñiz et al., 2023).

Ante la eficiencia de los humedales construidos es necesario difundir información con las personas para que conozcan sobre estos sistemas, ya que, con respecto a los sistemas de tratamiento de agua, no son muy conocidos en comparación a un sistema convencional, como los de lodos activados, reactores anaerobios o lagunas de oxidación. Típicas aplicaciones de tratamiento en áreas urbanas, mientras que en zonas rurales las aguas negras son comúnmente vertidas a cielo abierto o a ríos o arroyos, lo cual deja de manifiesto una contaminación permanente.

Pero surge la pregunta ¿Cómo se puede difundir información sobre los humedales construidos?, es aquí cuando la educación ambiental aparece, basada en la ética del cuidado del medio ambiente para revertir la situación y los diversos problemas ambientales (Acosta Marquez et al., 2026). Mediante estos procesos pedagógicos la sociedad aprende sobre su entorno, y son necesarios para mitigar los diversos problemas ambientales. La implementación de la educación ambiental resulta efectiva porque mejora la comprensión y conciencia ambiental, promueve prácticas sostenibles y un mayor compromiso con el medio ambiente (Sotelo Cabrera et al., 2024). Estos procesos se llevan a cabo mediante diversas estrategias educativas, no por ser diferente significa que una sea mejor que otra.

Son diversas las metodologías que realizan las personas para aprender sobre algo nuevo, hay diferentes estrategias didácticas, con el paso del tiempo estas han

evolucionado y algunas han salido fuera del aula, a estos procesos se les conoce como educación no formal, es un escenario cargado de posibilidades y particularidades, en estos encuentros entra la acción, la lucha social como la educación ambiental y las necesidades de intervención, ofrece flexibilidad facilitando la experimentación metodológica y la reconfiguración de roles, puede reforzar conexiones, genera conocimiento abordando situaciones locales, favoreciendo el reconocimiento de la realidad (Serván, 2026).

Son métodos de enseñanza que se emplean para facilitar los procesos de aprendizaje en las personas sin importar la edad (Morocho Pardo et al., 2024). Muchas de las estrategias didácticas son idóneas para implementarse fuera o dentro del aula, pero estas deben ser correctamente aplicadas para que el proceso sea satisfactorio. Es por ello que, dentro de los procesos educativos se deben realizar previamente secuencias didácticas.

Las secuencias didácticas son consideradas como el orden estructurado o pasos a seguir, estas instrucciones permiten que los conocimientos se apliquen adecuadamente a lo largo del proceso educativo, se divide en tres fases relacionadas; inicio, desarrollo y cierre, cada una con objetivos específicos para facilitar el proceso (Santolària Òrrios, 2019). Se considera que un proceso educativo debe ir diseñado previamente para lograr obtener los resultados esperados, con las secuencias didácticas se planifica y se lleva un mejor seguimiento de lo que se quiere lograr.

Derivado de todo lo anterior, se propuso la realización de una experiencia guiada para conocer sobre un humedal construido, se realizó con estudiantes de diferentes edades, sin embargo, el proceso siempre fue el mismo, es decir, que la secuencia didáctica se implementó de igual manera, aunque las edades no fueran las mismas. Se esperó que, con dicha experiencia educativa, se refuercen conocimientos y se genere sensibilización sobre la problemática de contaminación y sobre las alternativas ecológicas para remediarlo.

Metodología

Área de estudio

Este estudio fue aplicado en la comunidad de San José Pastorías, Actopan. En el Estado de Veracruz, México. Esto derivado de que es un sitio donde existe tanto un humedal domiciliario construido desde 2017, así como un humedal comunitario en operación desde 2016.

El proceso educativo que se implementó consistió en seis etapas, a continuación, se describen:

- 1). Actividad rompe hielo. Los estudios realizados sobre estas dinámicas indican que son esenciales para construir un ambiente de aprendizaje positivo, coadyuvan en el mejoramiento de habilidades como el habla y la escucha activa, así como para la activación cerebral (Ynot, 2024). Además, estas actividades apoyan en generar confianza entre ellos mismos y con los que realizan la actividad.
- 2). Proyección de videos sobre humedales contruidos y una breve explicación sobre su funcionamiento, los videos son útiles y sirven de apoyo didáctico cuando se quiere aprender algo nuevo (Pomares & Martínez, 2025). Posterior a esto, se realizaba la siguiente actividad.
- 3). Demostración de humedal domiciliario. En esta etapa a los estudiantes se les mostraba en físico el funcionamiento del sistema de tratamiento de agua, observaban como operaba y reforzaban lo visto anteriormente en los videos.
- 4). Demostración de carteles, a los estudiantes se les trasladaba caminando a otro sitio cercano en donde se encuentra el humedal comunitario de San José Patorias, y antes de pasar a ver el área de humedal construido se les presentaban algunos carteles respecto a investigación científicas que se han realizado tanto en el humedal domiciliario como en el humedal comunitario, con la intención de reforzar conocimientos con experiencias aplicadas.
- 5). Visita al humedal comunitario. En esta etapa se les explicaba a los estudiantes nuevamente el objetivo de los sistemas de tratamiento de agua como los humedales, su funcionamiento, sus ventajas y se atendían dudas por parte de los estudiantes.
- 6). Sesión fotográfica. Con un cuadro diseñado con temática de humedales, fue el marco perfecto para una sesión fotográfica de la vista al humedal.

En la figura 1 se presenta un esquema metodológico que sintetiza el proceso educativo que se realizó en la comunidad de San José Pastorías para conocer más sobre los humedales contruidos.

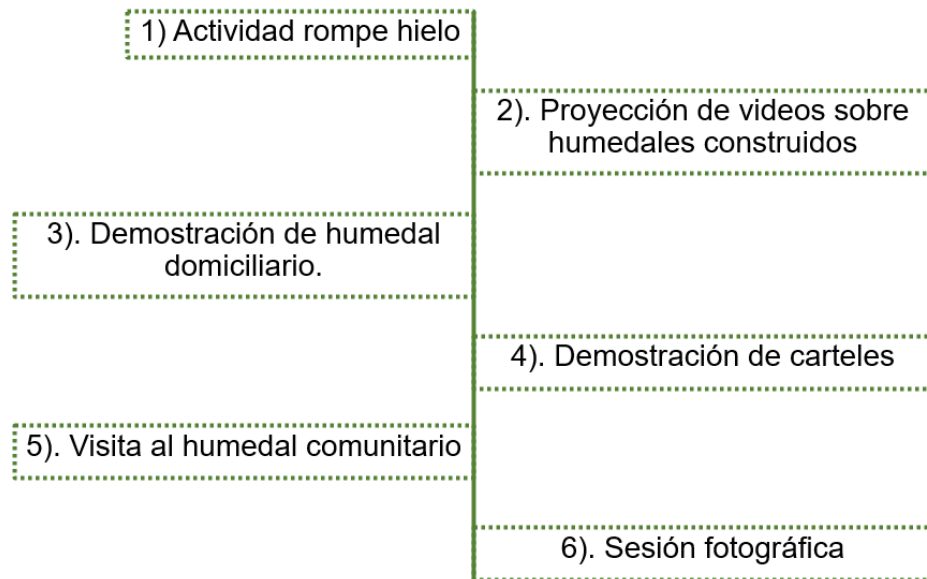


Figura 1. Esquema metodológico

Resultados y discusión

Respecto a la actividad rompe hielo (Figura 2) esta funcionó para que los diversos grupos de estudiantes entraran en confianza con todos los talleristas, al ser un proceso educativo largo durante el día, fueron varios los talleristas involucrados, encargados en diferentes etapas. Las diversas actividades rompe hielo fungieron como la bienvenida para todos los grupos de estudiantes, con estas actividades, los estudiantes se mostraron participativos y se observó que en caso de que los estudiantes al inicio mostraran timidez con los talleristas, paulatinamente con el desarrollo de la actividad empezaban a socializar más.

Las actividades rompe hielo generalmente son usadas al inicio de una sesión para generar una impresión positiva a los estudiantes, quien la realiza debe mostrar motivación, ser sensible al ambiente del contexto en el que se encuentra, adaptarse y facilitar el proceso de participación (Nur, 2023), son criterios importantes a considerar para realizar este tipo de actividades, se considera necesario e importante que la persona que realice la actividad rompe hielo sea sensible ante el contexto en el que se encuentra y sea capaz de adaptarse a las necesidades del momento en el cual se desarrolla la actividad.

En este caso la actividad rompe hielo consistió en jugar “El barco se hunde”, consiste en que un tallerista cante “el barco se hunde, el barco se hunde y solo hay lanchas

para 3. (el número puede cambiar, dependiendo la cantidad de personas que deben formar el subgrupo). Simultáneamente cuando el tallerista se encuentra cantando, todos los participantes se encuentran girando en una rueda grande agarrados de las manos, cuando el tallerista termine de cantar y mencione el número, todos los participantes deben hacer un subgrupo con el número que el tallerista mencionó. Si hay personas que se quedan sin equipo no se eliminan del juego, se regresa a la rueda grande agarrados de la mano y se inicia de nuevo el canto, ahora el tallerista debe decir otro número diferente para que los equipos no sean los mismos.



Figura 2. Actividad rompe hielo aplicada entre los estudiantes.

Posterior a la primera actividad, los estudiantes continuaron con la proyección de videos (Figura 3), en esta etapa los estudiantes visualizaron mediante audiovisuales lo qué es un humedal construido, su funcionamiento, por qué son importantes, cómo limpian el recurso hídrico mediante procesos físicos, químicos y biológicos y las ventajas de tener un sistema como este en comparación a un sistema convencional.

Además, se proyectó un video realizado en el humedal de la comunidad por RTV como caso de éxito de tratamiento de agua.

Se consideró importante y necesario, que antes de que la persona visitara el humedal construido, conociera lo que se mencionó anteriormente para tratar de llamar su atención, de igual forma, al ir al sitio donde se encuentra el sistema, los estudiantes ya tendrían más noción de lo que se encuentran visitando. Los videos facilitan la mediación pedagógica, sobre todo en temas complejos (Bastidas-Muñoz et al., 2025).

Derivado de que los humedales construidos no son un tópico muy conocido, se consideró que sería factible la proyección de videos para visualizarlos, entender y comprender un poco más previamente a ir a visitarlos. Como se observa en la figura 3, los grupos han sido de diferentes edades, y es importante modificar el vocabulario o la forma de comunicar dependiendo a quienes se les está enseñando.



Figura 3. Proyección de videos sobre humedales construidos.

Por otro lado, se ha reportado que los docentes buscan incluir a la educación ambiental en sus procesos de enseñanza-aprendizaje, sin embargo, se ven limitados por la falta de recursos educativos, así como la formación docente adecuada

(Velempini et al., 2018). Es por ello, que estos procesos externos a las instituciones educativas son ideales para aprender y reforzar tópicos nuevos respecto al medio ambiente, siempre y cuando se tenga la planeación adecuada y los integrantes talleristas capacitados en el tema. En este caso los participantes incluyeron tres investigadores en temas de sustentabilidad y ciencias ambientales, además de dos doctorantes y cuatros maestrantes en áreas de desarrollo regional sustentable y con formación de pedagogos, químicos y otras ingenierías, lo cual favoreció la planeación de las actividades organizadas.

Posterior a la visualización de videos, los estudiantes visitaron un humedal domiciliario (Figura 4), este humedal se encuentra en el jardín de una casa en San José Pastorías, es decir, en la misma localidad rural. Aquí principalmente se les demostró a los estudiantes que estos sistemas de tratamientos de agua no despiden mal olor, no tienen moscos y aparentan ser jardineras en los hogares, se recalcó que se puede mejorar la calidad de agua que sale de los hogares antes de llegar al drenaje comunitario. En este caso, el sistema está adaptado para limpiar las aguas grises, aguas de regadera, lavadero, lavadora y hasta la del lavado de techado en temporadas de lluvia. Se les comunicó a los estudiantes que en los humedales construidos pueden adaptarse y en ellos crecer plantas ornamentales, en la figura 4 se muestran algunos ejemplos de dichas plantas como las maracas amarillas (*Zingiber spectabile*), o el jengibre rojo (*Alpinia purpurata*).

Los humedales construidos son sistemas de tratamiento de agua en donde las distintas especies de plantas ornamentales regionales se pueden adaptar (González-Rivadeneyra et al., 2024), para explicar más a detalle sobre este tópico, los estudiantes fueron trasladados a la siguiente etapa, la cual fue: demostración de carteles (Figura 5), aquí los estudiantes aprendieron principalmente sobre el uso de plantas ornamentales en humedales construidos.

En el momento que los estudiantes llegaron a el área donde se encontraban los carteles, se les explicó el uso y el comportamiento que se obtuvo de los humedales construidos con diversas plantas ornamentales y diferente tipo de agua. Demostrando que esta tecnología se puede adaptar a diversos contextos para mejorar el recurso hídrico.



Figura 4. Demostración de humedal domiciliario.

Es importante señalar que los carteles se encontraban en un área cerca del humedal domiciliario, bajo árboles de mango que dan mucha sombra, el espacio es plano y se encuentra en condiciones para la estadía de personas para realizar actividades de relajación o en este caso de aprendizaje. Hay espacios que debido a su ubicación presentan condiciones favorables para realizar actividades de educación ambiental con la población, en ocasiones estos sitios son ocupados como salidas de campo para realizar prácticas y tener la posibilidad de trabajar en diferentes contenidos curriculares (Ruiz et al., 2015).

Los estudiantes mostraron interés y se sorprendieron de la posibilidad que tienen los humedales construidos de tratar diferente tipo de agua, ya que, al hablar de naturaleza desconocían que mediante estos procesos se puede tratar el agua. Uno de los carteles que se les mostró fue sobre el proyecto “Evaluación de humedales construidos sembrados con plantas ornamentales como tratamiento del nejayote (residuo del proceso de nixtamalización) y sus riesgos socioambientales en San José Pastorias, Actopan, México” aquí el estudio demuestra que estos sistemas son idóneos para tratar este tipo de aguas residuales de la industria nixtamalizadora, a la par de producir vegetación ornamental como las maracas amarillas, que vuelven al sistema más estético y generan dichas plantas de valor comercial (González, 2024).

Es necesario destacar que los humedales construidos han sido estudiados con diversos tipos de agua, un caso específico fue en Colombia, con respecto al tratamiento de agua con petróleo, fue propuesto como tratamiento para una posible implementación de agua de producción, los resultados demostraron que el tratamiento de aguas residuales de la industria petrolera es una opción viable siempre y cuando se tengan los espacios disponibles para su funcionamiento, y considerando especies regionales que puedan tolerar el efecto tóxico del agua a tratar (Díaz et al., 2013).

Posterior a la visita de carteles, se dirigieron los estudiantes a la visita al humedal comunitario de San José Pastorías (Figura 6) en donde a los estudiantes se les comunicó todo el recorrido que hace el agua al tratar desde que llega al drenaje. En esta etapa se mostraron los procesos de llegada a un sedimentador, en el cual el agua negra llega a este pozo, donde por proceso de sedimentación, las partículas de mayor peso se quedan abajo y el agua con menos lodos prosigue al tren de tratamiento, el cual consiste primero en una malla o cribado de separación para luego pasar el separador de grasas. Posteriormente el agua fluye hacia las diferentes celdas de humedales, donde el agua es tratada.

Los humedales construidos mostrados son de tipo subsuperficial, es decir, que el agua fluye entre el medio granular o poroso y no es visible. La vegetación sembrada en el sistema fueron plantas típicas de humedales naturales como el tule (*Typha* sp.) y otras ornamentales terrestres adaptadas a estas condiciones, como las banderas (*Canna hybrids*), aves de paraíso (*Strilizia reginae*), cunas de moisés (*Spathifillum blandun*), Heliconias y otras en menor densidad.

Los diversos grupos de estudiantes se mostraron interesados y sorprendidos debido a que pueden observar cómo es que funcionan a una escala mayor el sistema de tratamiento de agua. Dicho sistema trata el 100% de las aguas residuales de la comunidad que cuenta con casi 600 habitantes. Se les informa que el agua puede ser utilizada para diversas actividades como por ejemplo lavar el patio de las casas, regar las plantas, uso en WC, enfriamiento de maquinaria, etc. Pero en este caso por la lejanía del sistema con el pueblo (casi un kilómetro), es reutilizada para irrigación de cultivos.

Las experiencias y aprendizajes que se llevan en el sitio (humedal construido) son muy diferentes a las que se viven únicamente en cuatro paredes (aula), hay estudios que lo demuestran, no es lo mismo primero aprender sobre algún tópico y posteriormente dirigirse a él para reforzar los conocimientos, que únicamente abordar el tema en alguna clase.



Figura 5. Demostración de carteles.



Figura 6. Visita al humedal comunitario.

En la Universidad Pedagógica Nacional de Bogotá realizaron un proceso educativo en donde primero a los alumnos de una primaria se les explicó sobre un humedal natural, sus componentes y servicios ambientales. Posterior a ello, cuando los estudiantes ya conocían más sobre el tema reforzaron sus conocimientos visitando el ecosistema. La visita al ecosistema lo denominan laboratorio de aprendizaje o laboratorio social, porque aquí la sociedad aprende estando en el sitio (Díaz, 2020).

En el proceso que se realizó en San José Pastorías con las seis etapas, los estudiantes visitaron dos laboratorios sociales, el primero fue el humedal domiciliario y el segundo fue el humedal comunitario. Aquí los estudiantes refuerzan los conocimientos vistos previamente, es decir, la teoría que se les comunicó la reafirman visitando los sitios físicamente.

Posterior a que el agua es tratada mediante un humedal construido, el recurso hídrico puede ser utilizado para el riego agrícola (Muñoz-Nava & Baumann, 2017), las propiedades que ahora tiene el agua son más idóneas en comparación a dirigir el agua sin algún tratamiento previo. Los estudiantes pueden ver (Figura 7) mediante dos muestras de agua como se ve el agua antes de entrar al sistema y posterior a que haya recorrido todo el sistema. Únicamente mediante colorimetría el agua se observa de una mejor calidad, se les comenta a los visitantes que es importante hacer los análisis químicos para identificar las características del agua previo y posterior a que el agua ingrese al humedal construido.

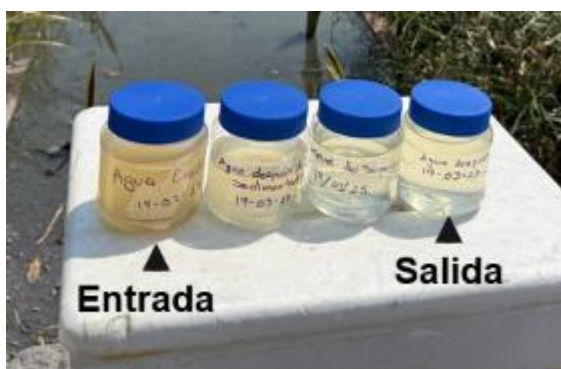


Figura 7. Muestras de agua del humedal construido

La calidad del agua es importante porque la presencia de contaminantes daña a las personas y a los ecosistemas acuáticos principalmente (León-Mejía et al., 2025), es por ello que, el recurso hídrico debe ser tratado antes de ser vertido a algún cuerpo de

agua, donde paulatinamente puede ocasionar problemas en el ecosistema afectando la flora y fauna y a la sociedad aledaña a él. De allí la importancia de su tratamiento previo.

Posterior a que los estudiantes recibieron la información sobre el funcionamiento del sistema, pasaron a la última actividad que fue la sesión fotográfica (Figura 8), para tal actividad se diseñaron cuadros como el que se puede observar en la figura y en grupos pasaron por la foto de su recuerdo visitando un humedal construido. Se espera que con todo el proceso que se realizó con los estudiantes, estos aprendieran algo nuevo sobre el tópico y se llevaran una experiencia significativa a casa sobre la importancia de estos sistemas y repliquen la información. Cabe mencionar que los diferentes visitantes en ningún momento realizaron alguna evaluación sobre lo visto en el proceso, y de igual manera no se les cuestionó sobre su experiencia durante las etapas de manera profunda, más que en las dinámicas rápidas.

La evaluación en procesos educativos es importante realizarla para poder identificar si las personas tienen algún cambio de conocimiento, se recomienda el uso de una prueba estandarizada para que a todas las personas se les evalúe desde el mismo instrumento (Hernández et al., 2018). Se considera que el uso de un instrumento para evaluar el proceso es más factible que únicamente realizar preguntas de manera oral, si esto sucediera, las preguntas no siempre serán las mismas y no se tendría un control exacto de lo que los visitantes piensen o aprendan durante el proceso.



Figura 8. Sesión fotográfica en el humedal construido.

Por otro lado, la vegetación del humedal varía dependiendo de cuál es la que se encuentra estudiando durante la visita, sin embargo, en la figura 9 se muestra un ejemplo de las plantas y fauna que se ha visto en el sistema de tratamiento de agua comunitario.



Figura 9. Flora y fauna del humedal construido. a) *Canna hybrids*, b,e) *Iguana iguana*, c) *Striltzia reginae*, d) *Heliconia latispata*.

Se recomendó a los profesores de los grupos visitantes preguntar en sus aulas sobre lo aprendido en la sesión, además se regalaron algunos libros sobre los humedales, para reforzar el conocimiento en las aulas.

Conclusiones

Las visitas al humedal construido con los grupos de estudiantes con las seis etapas se considera que son suficientes para lograr que los estudiantes tengan algún aprendizaje significativo, sin embargo, en estos procesos realizados en San José Pastorias, Actopan, México., no se llevó a cabo alguna evaluación previa ni posterior para identificar algún cambio de conocimiento, por lo que, se sugiere que procesos educativos similares se realicen evaluaciones para identificar si los visitantes generan nuevos conocimientos.

Se desconoce cuáles son las opiniones de los visitantes que han realizado este proceso educativo, por ello, también se sugiere que en futuros procesos similares los talleristas o los guías tomen en cuenta algún momento al final del proceso para recibir

comentarios sobre la experiencia vivida, para realizar posibles mejoras o identificar si no se debe modificar el proceso porque se desarrolla de manera correcta.

En cuanto a los humedales construidos utilizados como laboratorios sociales o laboratorios de aprendizaje, se considera que es una estrategia idónea para procesos de enseñanza debido a que en estos espacios los estudiantes salen del aula, tienen contacto con lo que están aprendiendo y experimentan otras formas de aprender más allá de los procesos tradicionales que se ven en las instituciones educativas, se recomienda que para un mejor aprendizaje significativo se saque al estudiante del aula para que no únicamente obtenga lo teórico, sino que aprenda y tenga contacto con lo que está visualizando o leyendo en los salones de clase.

Referencias

- Acosta Marquez, M. P., González Muñoz, O., Delfín Pozos, F. L., & Priego Salas, V. D. S. (2026). Proyecto de intervención ambiental en el municipio de Alvarado 2025. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, (28), 119–141. <https://doi.org/10.17141/eutopia.28.2026.6647>
- Aparicio Roque, F. G., & Mogollon Vizueta, C. J. (2025). Depuración de aguas residuales urbanas con humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 12, e3198. <https://doi.org/10.26495/9mxzby76>
- Bastidas-Muñoz, E. M., Yáñez-Palacios, J. F., Yáñez-Palacios, L. P., & Reino-Sanchez, D. E. (2025). Análisis pedagógico del uso de material audiovisual en el aula de matemáticas. *YUYAY: Estrategias, Metodologías & Didácticas Educativas*, 5(1), 84–98. <https://doi.org/10.59343/yuyay.v5i1.127>
- Díaz, S. E., Zamora, E. R., Caselles-Osorio, A., & León, J. A. (2013). Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un campo de petróleo colombiano. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 11(2), 53–63.
- Díaz, S. P. (2020). *El humedal como aula viva: escenario propiciatorio para la enseñanza de las ciencias naturales y la integración socioeducativa* [Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales]. Universidad Pedagógica Nacional.
- González, D. (2024). *Evaluación de humedales construidos sembrados con plantas ornamentales como tratamiento del nejayote (residuo del proceso de nixtamalización) y sus riesgos socio-ambientales en San José Pastorias, Actopan, México* [Maestría en Desarrollo Regional Sustentable]. El Colegio de Veracruz.
- González-Rivadeneira, D., Marín-Muñiz, J. L., & Hernández-Alarcón, M. H. (2024). Remoción de contaminantes en aguas residuales mediante humedales bioingenieriles domiciliarios con diferente tipo de sustrato y sembrados con *strelitzia reginae*. *Journal*

- of Energy, Engineering Optimization and Sustainability, 8(1), 1–14.
<https://doi.org/10.19136/jeeos.a8n1.5666>
- Hernández, M., Ramírez, É., & Gamboa, S. (2018). La implementación de una evaluación estandarizada en una institución de educación superior. *Innovación Educativa*, 18(76), 149–170.
- León-Mejía, G., Castro-Camacho, L. A., Franco Valencia, K., Ruiz-Benitez, M., Rodríguez Tapia, J., & Torres Cantillo, F. J. (2025). Evaluación de la genotoxicidad inducida por algunos metales presentes en aguas fluviales: Un Estudio con Allium cepa en el Cesar-Colombia. *Ecosistemas*, 34(2), 1–13. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2865>
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora, S. (2023). Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: A review of experiences during the last twenty-two years. *Processes*, 11(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Morocho Pardo, J. S., Poma López, L. N., Benites Coronel, C. R., Macas Armijos, G. M., Sarango Guallas, K. B., & Morocho Pardo, B. A. (2024). Estrategias didácticas para fortalecer la Educación Ambiental en los estudiantes, 9° grado “A” de la Unidad Educativa “Lauro Damerval Ayora.” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 3086–3105. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10735
- Muñoz-Nava, H., & Baumann, J. (2017). Remoción de bacterias coliformes en un sistema de lodos activados y humedal construido. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(11), 287–297. <https://doi.org/10.19136/era.a4n11.913>
- Nur, T. (2023). Breaking the ice in the classroom: using ice-breaking in the teaching and learning process. *Borneo Journal of English Language Education*, 5, 23–38.
- Pomares, C., & Martínez, L. O. (2025). Efecto de las cápsulas educativas digitales en la resolución de problemas matemáticos en estudiantes rurales de tercero de primaria. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 12364–12384. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16821
- Rodriguez Zuniga, D. P., González Duque, M. E., Rios Sánchez, D. A., Montes Vanegas, M., Quintero García, K. L., & Villa Cardona, F. E. (2025). Evaluación de soportes alternativos para la formación de biopelículas en humedales artificiales de flujo subsuperficial. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 27(2), 30–41. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v27n2.119648>
- Ruiz, S., Vasquez, M., Diez, P., & Manolucos, J. A. (2015). Experiencia didáctica en un humedal de la ciudad de río gallegos como laboratorio social. *Revista Del Departamento de Geografía*, 3(4), 215–229.
- Santolària Òrrios, A. (2019). La secuencia didáctica: un instrumento para escribir textos en Educación Infantil. *Didáctica. Lengua y Literatura*, 31, 285–302. <https://doi.org/10.5209/dida.65953>

- Serván. (2026). Investigar desde los márgenes de la investigación cualitativa en contextos de educación no formal. *Revista de Estudios Pedagógicos Contemporáneos*, 2(2), 1–17.
- Sotelo Cabrera, M. E., Ortiz Bolaños, O. H., & Revelo Cuaspud, H. A. (2024). Estrategias Pedagógicas que Favorecen la Educación Ambiental en el Entorno Escolar de los Estudiantes del Grado 1-3 de la Institución Educativa Municipal Técnico Industrial del Municipio de Pasto. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 11235–11254. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14507
- Velempini, K., Martin, B., Smucker, T., Ward Randolph, A., & Henning, J. E. (2018). Environmental education in southern Africa: a case study of a secondary school in the Okavango Delta of Botswana. *Environmental Education Research*, 24(7), 1000–1016. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1377158>
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>
- Ynot, R. (2024). The power of ice breaker activity: examining the impact of icebreakers on student participation and engagement in the classroom. *E-Science*, 1(1), 22.

Eje temático 2:

**Revisiones y análisis sobre el uso de humedales de
tratamiento**

Los humedales de tratamiento en México, una mirada de su uso y funcionalidad para limpiar las aguas residuales y análisis de su aplicabilidad en el sector turístico

Treatment wetlands in Mexico: an overview of operational performance for wastewater remediation and an analysis of applicability within the tourism sector

Raúl Castelán Cabañas, Roselia Servín Juárez, José Luis Marín-Muñiz, Juan Antonio Pérez Sato

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es una prioridad a nivel mundial por la grave contaminación de ríos, lagos y océanos. Al respecto, los humedales construidos o de tratamiento (HT) han surgido como una alternativa ecológica para mejorar la calidad del agua y para considerar su reutilización una vez pasada por tales sistemas. Esta ecotecnología, consiste en celdas rellenas de un medio granular y donde se siembra vegetación, por el lecho fluye el agua a tratar a condiciones de flujo acorde al diseño ingenieril del sistema, del volumen y tipo de agua a tratar. En este capítulo describe la importancia de la alternativa, así como la aplicación de HT en México, recalcando que la mayoría de los estudios se han replicado a nivel de laboratorio o de experimento piloto, y pocos aún a nivel de mayor escala, resolviendo problemas reales comunitarios o municipales, a pesar de que resaltan las remociones de contaminantes inorgánicos y orgánicos que efectúan, y que van desde un 40% a 90%, según el tipo de contaminante. Lo anterior deja de manifiesto el papel de los humedales en mitigar la contaminación de agua y la necesidad de su replicabilidad a mayor escala, donde el involucramiento de la sociedad con las autoridades y la academia resultan una necesidad para fomentar el uso y aprovechamiento de la ecotecnología a largo plazo. También se detectó como los HT con vegetación tanto de humedales naturales como ornamental, cumplen con similares funciones de fitorremediación y que, al usar plantas ornamentales, el diseño de los HT puede involucrar la creación de parques turísticos, que además de que limpien el agua, funcionen como espacios de aprendizaje y de esparcimiento.

Palabras clave: ecotecnologías, fitorremediación, aguas residuales, sistemas de tratamiento.

Abstract

Wastewater treatment represents a global environmental priority, given widespread anthropogenic contamination of riverine, lacustrine and marine ecosystems. Constructed (treatment) wetlands have emerged as an environmentally benign technology to enhance effluent quality and enable post treatment water reuse. This eco technology comprises engineered cells filled with granular filter media and planted with emergent vegetation; polluted wastewater percolates through the substrate bed according to system specific engineering specifications and influent volumetric and compositional characteristics. The present chapter reviews the relevance of this technology and its status of application across Mexico. While most existing Mexican studies remain confined to laboratory or pilot scale trials, with limited roll out for full scale municipal or community level deployment, reported pollutant removal efficiencies for organic and inorganic contaminants range from 40% to 90%, varying according to target pollutant species. These results confirm the capacity of treatment wetlands to attenuate water pollution and highlight the urgent requirement for large scale technology replication; such scaling up necessitates sustained collaboration between community stakeholders, regulatory authorities and research institutions to secure long term operational viability and maximize eco technology benefits. Furthermore, systems vegetated with native wetland flora or ornamental plant taxa deliver comparable phytoremediation performance. Ornamental plant-based configurations enable park style landscape integration for tourism relevant sites, creating multifunctional spaces that combine water purification with environmental education and recreational ecosystem services.

Keywords: eco-technologies, phytoremediation, wastewater, treatment systems.

Introducción

Los humedales contruidos o también llamados humedales de tratamiento, son sistemas diseñados 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; Marín-Muñiz, 2017). Éstos se caracterizan por ser celdas o canales donde hay un sustrato por donde fluye el agua a tratar y donde hay presencia de vegetación adaptada a dichas condiciones de saturación de agua. Los componentes principales de dichos ambientes son el suelo o sustrato, la vegetación, los microorganismos, y el agua, este último para algunos autores no es considerado como componente, porque es el medio a tratar, pero para

otros si es considerado un componente más y vital (Kadlec y Wallace, 2009; Vimazal, 2010).

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

1. Humedal de Flujo Superficial (FS) (Figura 1). Es similar en apariencia a un humedal natural, en donde el agua está expuesta a la atmósfera y tienen áreas abiertas de agua. A diferencia de los otros dos tipos de HT, este puede tener plantas flotantes, sumergidas y emergentes. Las plantas emergentes se caracterizan porque están enraizadas al suelo o sustrato y sobre salen de la columna de agua. Las flotantes son aquellas cuyas hojas y flores flotan sobre la columna de agua, mientras que su raíz puede estar arraigada al suelo o sustrato (flotante enraizada) o hay otras cuyas raíces solo están dentro del agua, sin estar ancladas al suelo (flotante no enraizada).

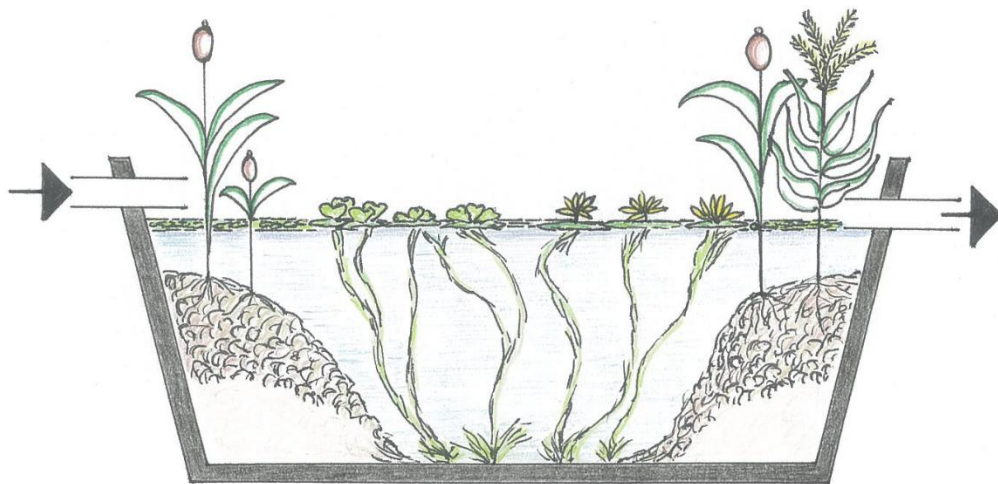


Figura 1. Humedal de Flujo Superficial. Fuente: Elaboración propia

2. Humedal Subsuperficial de Flujo Horizontal (SSFH): En este tipo de HT la celda o canal está rellena de una cama de sustrato (grava, tezontle, entre otros), en donde se siembra vegetación emergente. El agua se mantiene por debajo de la superficie del sustrato y su característica principal es que fluye horizontalmente desde la entrada (afluente) a la salida (efluente).

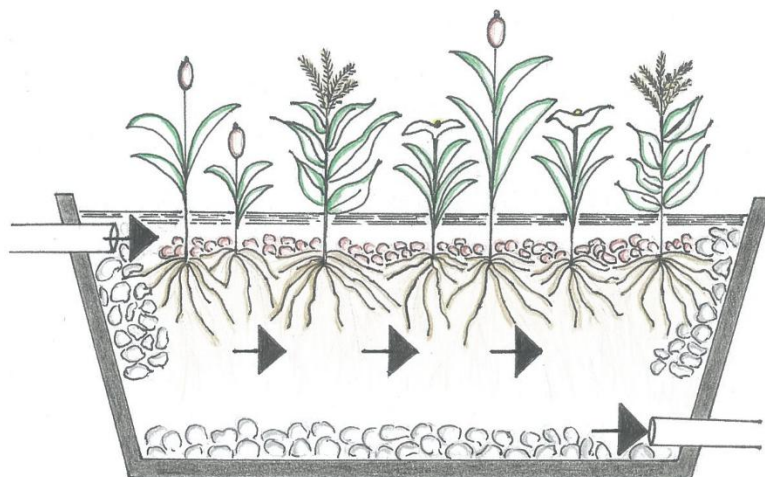


Figura 2. Humedal de Flujo Subsuperficial.

Fuente: Elaboración propia.

3. Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical (SSFV). La característica principal de este tipo de HT es que el agua a tratar se distribuye por todo el sistema, desde la superficie hacia el fondo a través de una tubería ranurada o con orificios por la cual el agua es rociada. Estas celdas también emplean una cama o relleno como sustrato, donde la vegetación sembrada es de tipo emergente. Comúnmente el flujo de agua en estos sistemas requiere de rociados paulatinos que permitan la actividad aerobia mientras no hay rociado, para lograrlo se utilizan bombas con temporizadores para manipular al tiempo requerido la dispersión o rociado del agua.

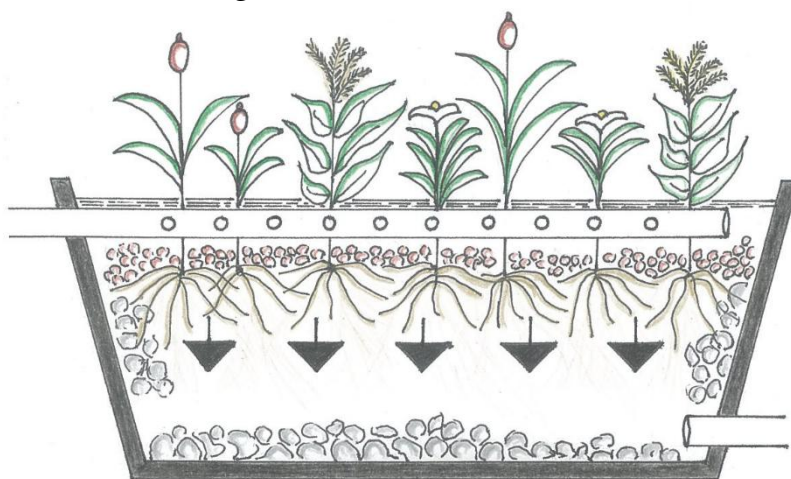


Figura 3. Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical. Fuente: Elaboración propia.

Los HT 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 HT 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 HT 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, dichas condiciones climáticas y biológicas 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 posiblemente un valor agregado con la implementación de plantas ornamentales con valor comercial y estético (*ibíd.*).

Considerando lo anterior, este capítulo tuvo como objetivo describir el tratamiento de las aguas residuales con humedales de tratamiento y analizar aquellos sistemas utilizados en el país.

Metodología

La información que se presenta en este estudio es referente a la utilización de sistemas de humedales de tratamiento con humedales, clasificando entre aquellos que utilizan vegetación de humedales naturales o vegetación ornamental terrestre de adaptación a HT en México. Cabe mencionar que a pesar de que existen más trabajos de este tipo en el país, solo se tomaron en cuenta los que contienen información suficiente para los fines prácticos de este trabajo. La búsqueda se realizó entre buscadores latinos y Google académico o consultando en las mismas secciones de referencias de los estudios encontrados. Las palabras con que se buscó la información incluyeron: humedales artificiales, humedales construidos, sistemas bioingenieriles de humedales y humedales de tratamiento, sumados a la palabra México.

Resultados y discusión

Tratamiento de agua residual con humedales en México

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

De acuerdo con datos del Censo Poblacional del INEGI (2010), 77.8% de la población mexicana vive en zonas urbanas y 22.2% en zonas rurales, donde los métodos de tratamiento convencionales, 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 lento desarrollo de los HT 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 y pueden generar los HT en zonas rurales. Infortunadamente dichos esfuerzos no han sido suficientes (García-García et al. 2016).

En este sentido, Hernández (2013), menciona que solo 7% de los HT operan de manera real el tratamiento de aguas residuales, el resto son experimentos científicos, que bien son de gran utilidad, pero es necesario también empezar a aplicar los conocimientos científicos sobre HT en las comunidades de manera tangible.

Humedales de tratamiento con plantas comunes de humedales naturales en México

Dentro de las modalidades de los tipos de HT existentes, es posible utilizar diversos sustratos, así como diferentes tipos de plantas para el tratamiento de las aguas residuales. De esta manera, los HT 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 de humedales (Hernández, 2016).

En la tabla 1, se reportan algunos de los estudios detectados acerca de investigaciones realizadas en México de HT con sistemas que utilizan exclusivamente plantas características de los humedales naturales. Cabe señalar que dicho uso de tales plantas radica en que son plantas adaptadas a que sus raíces estén en contacto

permanente con el agua, y que considerando que los HT surgen como una instalación de los humedales naturales, es por ello que al inicio de los diseños de estos sistemas, siempre se consideró el uso de estas y se ha comprobado su capacidad fitorremediadora tanto para aguas residuales de tipo doméstico, comunitario, e industrial.

Entre lo detectado se resaltan las remociones de contaminantes que incluyen tanto compuestos nitrogenados, fosforados y de materia orgánica medida como DQO o DBO con remociones que van desde el 40% hasta los 96%, indicando que tales alternativas resultan viables ambientalmente y donde las especies *Typha*, *Pontederia*, *Scirpus* y *Pragmites* han sido de las más ampliamente reportadas por su adaptación y función fitorremediadora, remarcando a estas como conspicuas especies.

Tabla 1. Humedales de tratamiento en México con plantas comunes de humedales naturales

Tipo de HT	Vegetación utilizada	Sitio	Área (m ²)	Tipo de agua	TRH (días)	Flujo (m ³ /d)	Tipo de sustrato	Planta/ m ²	Pre-tratamiento	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
FL	<i>Scirpus americanus</i> <i>Typha latifolia</i> <i>Eichomia crassipes</i>	CDMX	7.2	Tratada mezclada con municipal	45	-	Tezontle	-	Planta de tratamiento	DQO: 71 Calcio: 91 Cloruro: 77 Nitrato: 36 Nitrito: 82 Amonio: 99.9 Col. T.: 94 Col. Fecales 91	Martínez et al. 2003
SSFH	-	Akumal, Quinatan Roo	81.2	Doméstica	-	1.56	Grava	-	Tanque séptico	Materia orgánica: 68%	Whitney et al. 2003
SSFH	<i>Pontederia sagittata</i>	Xalapa, Veracruz	0.90	Residual de la producción de etanol de caña de azúcar	5	0.72	Grava volcánica	3.1 planta madura	Directo	DQO: 80 NTK: 76 SO ₄ : 68	Olguín et al. 2008

Híbrido SSFH-FL	<i>Typha Domingensis</i>	Yuriria, Guanajuato	5.1	Municipal	SSF: 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, 2008
SSFH	<i>Phragmites australis</i> <i>Typha domingensis</i>	Cuernavaca, Morelos	1.62	Mezcla de aguas de sanitarios, jabonosas y de laboratorios	5	-	Tezontle y arena	3 <i>P. Australia</i> 12 <i>T. dominiguensis</i>	Fosa séptica	DQO: 93 PT: 31 N-NH ₄ : 81.7	Romero-Aguilar et al. 2009
Sistemas por separado: SSFH FS	<i>Typha</i> sp	Xalapa, Veracruz	Cada celda 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 SSFH: 4	259.2	Tezontle	50	Filtro de arena Tanque séptico (TS)	DBO: 94-98 DQO: 91-93 SST:	Rivas et al, 2011

LM-SSFHP				LM: 5.5 SSFH P: 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	150 plantulas	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>Saccharum officinarum</i>	Tapachula, Chiapas	1.4	Residuales de beneficio de café	12	0.016	Grava y arena	4 brotes	Directo	DQO: 90 DBO: 40 NT: 83 PT: 97 CT: 88 CF: 89	González-Roblero, 2012
SSFV	<i>Phragmites australis</i> <i>Gladiolus spp</i> <i>Typha latifolia</i>	Tepatitlán de Morelos, Jalisco	-	Doméstica	7	0.015	-	-	Desarenador y trampa de sustancias ligeras	DQO: 87 NT: 64 PT: 76 Grasas y aceites: 60	Castañeda y Flores, 2013
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	Rodríguez-González, 2013

											SST: 60 DQO: 50	
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 (Humedal flotante)	<i>Pontederia sagittata</i> <i>Cyperus papyrus</i>	Xalapa, Veracruz	50.5	Lago urbano	-	-	-	-	Directo		DQO: 71.7 SDT:40 N-NH4: 27 N-NO3: 61.4	Olguín et al. 2014
Híbrido: SSFH-Laguna-SSFH	<i>Typha latifolia</i> <i>Phragmites australis</i>	CDMX	18.3	Pretratadas en planta y negra	-	7.86	Grava volcánica	-	Planta de tratamiento		Remoción de materia orgánica: 65	Barceló et al. 2014
SSFH FL	SSFH: <i>Paspalum paniculatum</i> <i>Cyperus articulatus</i> FL: <i>Typha</i>	Villahermosa, Tabasco	36	Residual de centro educativo	SSFH: 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

	<i>latifolia</i> <i>Eichhornia</i> <i>crassipes</i>											
SSFH	<i>Pontederia cordata</i> <i>Phragmites australis</i>	Villahermosa, Tabasco	24	Residual de centro educativo	7	1.6	Grava	<i>P.c.</i> : 5 <i>P.a.</i> : 6.6	Directo	DBO: 95 DQO: 95 PT: 81 SST: 94	Marín-Acosta et al. 2016	
SSFH	<i>Sagittaria latifolia</i>	Tabasco	3/celda	Residuales domésticas	4.8	0.15	Grava	-	Directo	SST: 97, NT: 97, PT: 97	García et al. 2019	
SSFH	<i>Thypha sp.</i> y <i>Scirpus sp</i>	Arandas, Jalisco	27	Aguas porcinas	10	-	Arena y arcilla		Laguna de sedimentación	DQO: 74, NT: 65, PT: 64	Mora-Orozco et al. 2020	
SSFH	<i>Typha latifolia</i>	San Luis Potosí	0.45/celda	Aguas con fármacos	3	0.014	Grava	4	Directo	Diclofenaco: 82, Naproxeno : 74.5	Zapata-Morales et al. 2023	
	<i>Pontederia cordata</i> , <i>Thalia geniculata</i> , <i>Sagittaria lancifolia</i>	Villa Hermosa, Tabasco	-	Aguas residuales domésticas	0.9	42.3	Grava	-	Directo	DQO: 79	Romellón et al. 2023	

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. **TRH:** Tiempo de retención hidráulica.

En la tabla 1 se puede corroborar lo que señala Hernández (2013), la mayoría de las investigaciones se enfocan en cuestiones de tipo experimental, lo cual sin lugar a duda son la base para poder emprender un sistema biológico de tratamiento en un proyecto concreto. La importancia de estos estudios radica en determinar que plantas funcionan mejor en cada región del país, para que tipo de agua, porcentajes de remoción y otros datos que pueden ser de gran ayuda al momento de plantear un HT en alguna región, comunidad, casa, escuela o cualquier lugar donde sea pertinente.

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

Por otro lado, la falta de manuales de diseño y operación de HT tanto para las autoridades como para usuarios directos, lo cual ha sido una barrera que no permite la implementación de estos sistemas. Cabe señalar que existen diversos manuales, pero regularmente están escritos en inglés, lo cual dificulta su entendimiento, principalmente en la zona rural.

Por último, persiste una barrera más, que se relaciona con la desigualdad social del país. En la mayoría de los casos, es difícil que las familias o las comunidades de zonas rurales inviertan en cuestiones de saneamiento de sus aguas residuales, siendo que existen otras prioridades de supervivencia básica (comida, techo, servicio, etc.). Tal vez por esta razón, se han propuesto algunas alternativas para intentar que estos sistemas sean adoptados con mayor facilidad, como lo es el uso de plantas ornamentales en HT.

Humedales artificiales con plantas ornamentales en México

El uso de plantas ornamentales en HT ha crecido en los últimos años alrededor del mundo, principalmente en zonas tropicales y subtropicales donde la variedad de plantas es mucho mayor y los recursos económicos para la implementación de este tipo de tratamiento es escaso.

La siembra de plantas ornamentales con valor comercial en HT puede representar la generación de un beneficio económico extra para las comunidades rurales (Belmont y Metcalf, 2003; Zurita et al, 2009; Konnerup et al. 2009), entre otros beneficios.

Con esta estrategia se intenta que las comunidades adopten el sistema con mayor facilidad, de tal forma que además de estar tratando sus aguas residuales, puedan beneficiarse del mismo, por medio de la venta de plantas ornamentales en el mercado local, además de que la calidad visual del paisaje puede mejorar considerablemente, cuestión en muchas ocasiones poco valorada, pero que tiene repercusiones psicosociales positivas en el día a día de las personas (Aliata y Silvestri, 2001).

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

En México se han realizado varios experimentos con plantas ornamentales, principalmente en centros educativos a nivel piloto, aunque también se cuenta con un par de casos de éxito utilizando esta modalidad en comunidades rurales, los cuales se describen en el siguiente apartado.

En la tabla 2 se presentan estudios realizados con plantas ornamentales en México a nivel piloto, algunos casos donde esta ecotecnología se ha implementado en comunidades o en pequeñas localidades para tratar de erradicar la descarga de aguas residuales en cuerpos de agua con la posibilidad de vender las plantas producidas y/o la reutilización de agua para riego o acuacultura, así como el uso de HT para tratar aguas residuales para fines recreativos y estéticos.

Tabla 2. Humedales artificiales en México con plantas ornamentales

Tipo de HT	Vegetación utilizada	Sitio	Área (m²)	Tipo de agua	TRH (días)	Flujo (m³/día)	Tipo de sustrato	Planta/ (m²)	Pre-tratamiento	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
**SSFH	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Zona central de México	0.91	Municipal	2	0.04	Grava	24	Directo	DQO: 35 NT: 45.6 NPEO (nonil fenol etoxilado): 96.6 NP (nonil fenol): 54.1	Belmont y Metcalfe, 2003
Híbrido: SSFH - SSFV	<i>Zantedeschia Aethiopica</i> y <i>Canna flaccida</i>	Texcoco, Estado de México	11.2	Doméstica	2.3	2.8	-	-	Terrazas de sedimentación y laguna de estabilización	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>Strelitzia reginae</i> , <i>Zantedeschia esthiopica</i> , <i>Canna hybrids</i> , <i>Anthurium andreanum</i> , <i>Hemerocallis</i>	Ocotlán, Jalisco	0.06	Municipal	4	0.005	Tezontle	-	Tanque de sedimentación	DQO: >75 P: 66 Coliformes: >99	Zurita et al. 2006

	<i>dumortieri</i>											
*SSFV	<i>Saccharum spp, Panicum maximum, Vetiveria zizanoides, Heliconia psittacorum y Clorophytum conmutatum.</i>	Tapachula, Chiapas	300	Mezcla de municipal con agua de lavado de beneficio de café	5.6	10	Grava y arena de mar	4	Sedimentador es tipo Emscher y tanque amortiguador	DQO: 92 Coliformes: 95	Orozco et al, 2006	
Híbrido SSFH-SSFV	<i>Zantedeschia aethiopica, Strelitzia reginae, Anturium andreanum 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 NH4: 72.2 PT: 50 CT: 96.9	Zurita et al. 2009	
*SSFV	<i>Zantedeschia aethiopica, Arundo donax y Medicago sativa</i>	CDMX	55	Mezcla de residual tratada biológicamente, con residuales domésticas y agrícolas	1.58	4	Grava sílica	-	Directo con Tratamiento posterior al humedal con filtro de pulimento	DQO: 92 N-NH4: 85 P-PO4: 80	Ramírez-Carrillo et al. 2009	
Híbrido: SSFH - SSFV	<i>Zantedeschia aethiopica y Heliconia Golden Torch</i>	Xalapa, Veracruz	0.38 para ambos	De río	3	-	SSFH: suelo	-	Directo	DQO: 70 P-PO4: 76 NO3: 76	Galindo-Zetina, 2012	

SSFV: grava volcánica												
*SSFH	Zantedeschia aethiopica Anemopsis californica	Ocotlán, y Jalisco	1	Subterránea contaminad a con arsénico	5	-	-	12	Z.	Directo	-	Del Toro- Sánchez et al. 2013
									16 A.			
									califor- nica			
*Híbridos:	SSFH:	Ocotlán,	SSFH:	Residual de	-	H1	y	Tezontle	-	Directo	Remoción	Tejeda et
H1:	Zantedeschia	Jalisco	0.48	la		H2:	0.03				másica:	al. 2014
SSFH - LE	aethiopica, Iris			Universidad							H1: 60	
	sibirica, Thypha		SSFV:	y concentra-		H3:					H2: 55	
H2:	latifolia		0.23	ciones		0.036					H3: 37	
SSFH – SSFV				inyectadas								
	SSFV: Strelitzia		LE:	de								
H3:	reginae		0.48	carbamaze-								
SSFV - SSFH				pina								

3 Híbridos	SSFH:	Ocotlán,	LE: 0.49	Mezcla de 3	0.2	Tezontle	SSFH: 3	Tanque	Org-N:	Zurita y
SSFH - LE	<i>Zantedeschia</i>	Jalisco		grises de				sedimentador	47.9-83.1	White,
	<i>aethiopica</i> (6		FH: 0.48	cafetería y			SSFV: 1		NT:	2014
SSFV - SSFH	meses) después			negra					56-20	
	<i>Canna indica</i> (3		FV: 0.23						DQO:	
	meses)								0-79.6	
SSFH - SSFV	SSFV: <i>Strelitzia</i>								DBO:	
	<i>reginae</i> .								60.5-96.6	
									<i>E. coli</i> :	
									99.4-99.9	
									NH ₄ :	
									72-85	
*SSFH	<i>Zantedeschia</i>	Guadalaja-	1.53	Agua con 3	-	Tezontle	12	Directo	79	Zurita et
	<i>aethiopica</i>	ra, Jalisco		arsénico					remoción	al. 2014
	<i>Iris sibirica</i>								de	
									arsénico	
*Híbrido:	SS-FH:	CDMX	Sistema	Efluente de -	250	SSHf:	-	Pretratamien-	DBO: 79	Luna y
SSFH - FS	<i>Phragmites</i>		total:	una planta		grava de		to: filtro de	SST: 84	Aburto,
	<i>australis</i> ,		8086	de		roca		agregados		2014
	<i>Equisetum</i>			tratamiento		ígne y		calcáreos y		
	<i>hyemale</i> y		SSFH:	con lodos		roca		Un	NT:96	
	<i>Cyperus papyrus</i>		2351	activados		caliza		sedimentador		
	FS:							Postratamien-	Colifor-	
	<i>Schoenoplectus</i>		FS:					to:	mes: 99	
	<i>Californicus</i> ,		5734					un muro		
	<i>Juncus effusus</i> ,							gavión		
	<i>Juncus acutus</i> ,							filtrante		
	<i>Nymphae</i>									
	<i>mexicana</i> ,									
	<i>Hydrocotyle</i>									

	<i>ranunculoides,</i> <i>Polygonum</i> <i>amphibium,</i> <i>Sagittaria</i> <i>demersa,</i> <i>Potamogeton</i> <i>pusillus,</i> <i>Ceratophyllum</i> <i>demersum,</i> <i>Wolfia</i> <i>columbiana</i> y <i>Lemna gibba</i>										
SSFH	<i>Canna hybrids</i> y <i>Strelitzia reginae</i>	Guadalaja- ra, Jalisco	65	Doméstica	3	11	Tezontle	3	Filtro anaeróbico de flujo ascendente	DQO: 86 NT: 30-33 PT: 24-44	Merino- Solís et al. 2015
SSFH	<i>Canna Indica</i>	Guadalaja- ra, Jalisco	0.36	Agua vinaza	con 3	-	Tezontle	23	Directo	DQO: 73 DBO: 88.3 TSS: 55 NT:55	López- Rivera et al. 2015
SSFH	<i>Heliconia stricta,</i> <i>Heliconia</i> <i>psittacorum</i> and <i>Alpinia</i> <i>purpurata</i>	Tapachula, Chiapas	27.5	Doméstica	1	-	Grava, arena y rocas de río	3	Digestor anaerobio	DBO: 35-48 DQO: 45-64 PT: 1.7-39 NT: 30-39	Méndez- Mendoza et al. 2015

*Híbrido SSFV - SSFH	<i>Zantedeschia Aethiopica Phragmites australis</i>	Tijuana, Baja California	SSFV: 15.66 SSVH: 19.2	Residual de centro educativo	-	-	Arena y grava	-	Tanque séptico y sedimentador	DBO: 70%	Hallack- Alegría et al. 2015
3 Híbridos: SSFH - LE SSFH - SSFV SSFV - SSFH	<i>Zantedeschia Aethiopica Strelitzia reginae</i>	Guadalaja ra, Jalisco	SSFH: 0.48 SSFV: 0.23 LE: 0.49	Mezcla de grises, negras y residuales de laboratorio	3	0.2	Tezontle	-	Directo	<i>E. Colli</i> : 99.93 CT: 99.99	Zurita et al. 2015
*SSFH	<i>Typha domingensis, Cyperus papyrus, C. alternifolius, Zantedeschia aethiopica, Lilium sp, Anthurium sp. y Hedychium coronarium</i>	Pinoltepec, Emiliano Zapata, Veracruz	60	Residual comunitaria	3	20	Tezontle	-	Directo	NT: 47 PT: 33 DQO: 67 ST: 34	Hernán- dez, 2016
SSFV	<i>Canna hybrids</i>	Misantla, Veracruz	0.5/celd a	porcina	-	-	Grava volcánica	1/celda	Directo	DQO: 60- 70%. PT: 40	Mateo et al. 2019
SSFH	<i>Canna hybrid, Alpinia purpurata y Hedychium coronarium</i>	Pastorías, Actopan, Veracruz	3.6	Doméstica rural	3	-	Roca de río	-	Sedimentador	F: 35-45 Cl: 28-34	Marín- Muñiz et al. (2020)

SSFV	<i>Spathiphyllum blandum</i>	Misantla, Veracruz	0.31/cel da	doméstica	3	-	Tezontle y residuos PET		Sedimentador	TDS: 40-50	Sandoval et al. 2020
SSFV	<i>Zingiber spectabile</i>	Zongolica, Veracruz	0.09/ celda	Aguas acuícolas	-	-	Grava	1 por celda	Directo	33.3% SDT	De Jesús et al. 2022
SSFH	<i>Canna hybrid, Alpinia purpurata</i>	Pastorías, Actopan, Veracruz	3.6	Lactosuero	3	-	Roca de río/PET	-	Sedimentador	DQO: 83, DBO: 77	Marín- Muñiz et al. 2024

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.

La eficiencia de remoción con plantas ornamentales utilizadas en México de la tabla 2, reporta que por un lado existe una variedad considerable de plantas ornamentales a utilizar en HA, debido a las condiciones climáticas del país, lo cual abre el abanico de posibilidades para seguir experimentando con nuevas especies para diversos objetivos de remoción. Por otro lado, y posiblemente lo más importante, es que la eficiencia de remoción es muy similar a las plantas usadas comúnmente en HT con plantas de humedales naturales: *Scirpus* sp., *Typha* sp. y *Phragmites* sp. (Vymazal, 2011), lo cual sustenta con mayor fuerza la implementación de estas especies ornamentales adaptadas a condiciones humedal.

Humedales de tratamiento aplicados en el sector turístico en el mundo

A pesar de que la información respecto a la relación entre actividades de recreación y turismo con HT es sumamente escasa, existen algunos ejemplos alrededor del mundo que permiten vislumbrar la sinergia positiva que puede generarse entre estos dos elementos aparentemente alejados.

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 HT, 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 HT 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 HT 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 en conjunto 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 HT para mejorar la calidad del agua de un río urbano antes totalmente degradado. En la actualidad, 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 HA, en cualquier lugar del planeta.

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

En Costa Rica, la universidad EARTH, cuenta con varios HT, que funcionan como módulo demostrativo de investigación, así como 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, 2015).

En Portugal, Calheiros et al. (2015), vinculan 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 HT 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.

Humedales artificiales aplicados en el sector turístico en México

De acuerdo con el conocimiento adquirido sobre HT en México, existen cuatro casos documentados 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 alta. Esta zona es un punto de reunión tradicional de los habitantes de la ciudad, donde es posible realizar caminatas, tirolesa y en algunas ocasiones remar en los lagos.

Los resultados de este trabajo realizado por Olguín et al. (2014), aun requieren extender la investigación para confirmar la efectividad del sistema, donde se utiliza un HT flotante con plantas nativas de humedales naturales. Sin embargo, 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 en una de las ciudades más grandes del mundo, la Ciudad de México (CDMX), específicamente en el Lago del Bosque de Aragón, al oriente de la ciudad. Este HT mide aproximadamente 1 ha, se encuentra en una superficie de 12 ha, y trata las aguas provenientes de una planta de tratamiento de lodos activados en donde se usan algunas plantas ornamentales con fines estéticos.

El sistema se compone de dos tipos de HT, 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 (Luna-Pabello y Aburto-Casteñeda, 2014). Cabe mencionar que, en este HT, se usan algunas plantas ornamentales con fines estéticos.

De acuerdo con Whitney et al. (2003), el tercer sistema de HT 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 futuro y la poca participación de los habitantes 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 y no permiten el paso libre.

Adicionalmente, de la información disponible, el cuarto sistema de HT en México se ubica en el Ejido Julián Villagrán del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo. Este trabajo inició desde 1995 con la implementación de un HT 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 con valor comercial, el alcatraz (*Zantedeschia sp.*). El proyecto está a cargo de 16 miembros de la etnia hñahñu (Otomí) de la región, quienes integran una sociedad cooperativa denominada “La Coralilla” (García-García et al. 2016).

En un principio las mujeres de la cooperativa vendían los alcatraces en arreglos florales y el agua se reutilizaba para el riego de hortalizas. Posteriormente el HT se expandió hasta alcanzar 400 m² y la cooperativa decidió producir tilapia (*Oreochromis sp.*), para la venta en un restaurante que también pertenece a la cooperativa (la calidad del agua está certificada para la producción de peces por la SENASICA). En la actualidad cuentan con actividades de remo y pesca en una laguna artificial.

La Sociedad Cooperativa La Coralilla, es una iniciativa ejemplar a nivel internacional en cuanto al manejo eficiente de los recursos naturales en manos de pueblos originarios, en combinación con el sector académico y organizaciones de la sociedad civil. Es digno de resaltar como lo que en un principio era un problema ambiental, fue transformado en un nicho de oportunidad de desarrollo comunitario en todas las esferas de la llamada sustentabilidad.

Por último, si bien no es un proyecto de turismo, vale la pena mencionar la estrategia aplicada en el municipio de Pinoltepec, Veracruz, en 2013. Donde se parte de una visión de participación comunitaria para el manejo de un HT 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 el HT, está conformado por cinco mujeres que dan mantenimiento y al mismo tiempo producen alcatraces, anturios y azucenas, las cuales son vendidas una vez que alcanzan el tamaño comercial necesario. Además, reutilizan el agua del efluente del HT para el riego de un vivero de violetas que también se incluyó en el proyecto.

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

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

Como se constató en la sección anterior, son escasos los proyectos ecoturísticos que ofrezcan servicios dentro de las modalidades existentes dentro del turismo de naturaleza que cuentan con sistemas de tratamientos con HT para tratar las aguas residuales generadas en esta actividad y la Zona Centro de Veracruz no es la excepción.

Las razones pueden ser varias, es probable que los dueños de estos centros desconozcan la normativa NMX-AA-133-SCFI-2013 que certifica el desempeño sustentable y buenas prácticas ambientales en las ramas del turismo de naturaleza, denominado exclusivamente para esta norma como ecoturismo, donde el manejo de las aguas residuales es un requisito primordial.

Por otro lado, es probable que la falta de recursos económicos para instalar sistemas de tratamiento y principalmente la falta de conocimientos de las alternativas existentes como las ecotecnologías, limita la implementación de las mismas, siendo que estas pueden generar un valor agregado de reconocimiento social e ingresos económicos adicionales, además de los beneficios ambientales.

Cabe mencionar, que existen otros métodos de tratamiento a pequeña escala que pueden erradicar la contaminación de cuerpos de agua como los baños secos y los biodigestores, los cuales se presentan en Veracruz y otras regiones del país (Ortiz-Moreno et al. 2014).

A continuación, se muestra una relación entre algunos de los centros ecoturísticos más conocidos de la de la Zona Centro de Veracruz y el manejo de sus aguas residuales.

Tabla 3. Relación de la utilización de HT en proyectos ecoturísticos de la zona Centro de Veracruz

Proyecto turístico		Ubicación	Tipo de turismo de naturaleza	Antigüedad	Cuenta con sistema de tratamiento	Cercanía un cuerpo de agua
Centro Agroecoturístico Playa la Junta		Ojo de Agua grande, Amatlán	De aventura, rural y ecoturismo	16 años	Humedal de tratamiento	Río Atoyac
Rancho Fermín	San	Potrero Viejo, Atoyac	Ecoturismo y rural	8 años	Las aguas grises son vertidas sin tratamiento para cultivo de caña	Cuenta con lagunas artificiales
Finca Martha Ecosuites	Santa	Los Reyes, Zongolica	De aventura y ecoturismo	1 año	Sin tratamiento, al drenaje	---
Villas Pico de Orizaba	de	La Perla	De aventura y ecoturismo	12 años	Fosa séptica	Escurrimientos del Pico de Orizaba
Chula Camping	vista	Fortín de las Flores	De aventura y ecoturismo	12 años	Sin tratamiento, al drenaje	Río Metlac

Proyecto turístico	Ubicación	Tipo de turismo de naturaleza	Antigüedad	Cuenta con sistema de tratamiento	Cercanía un cuerpo de agua
La compañía de Jesús	Zongolica	Ecoturismo	4 años	Sin tratamiento directo al drenaje	---
Restaurant Ecoturístico la 88	Zongolica	Ecoturismo	12 años	Fosa séptica	---
El Jardín de la Salud	Fortín de las Flores	Ecoturismo	20 años	Biodigestor	Río Metlac
Centro Agroecoturístico Tepexilotla	Tepexilotla	Rural y ecoturismo	12 años	Fosa séptica	Río Metlac
Centro Agroecoturístico e Investigación San Juan de la Punta	Cuitláhuac	Ecoturismo	6 años	Fosa séptica	Cuenta con lagunas artificiales
Centro ecoturístico Tenochtitlán	Ojo de Agua Grande, Amatlán	De aventura y ecoturismo	5 años	Fosa séptica y baños secos	Nacimiento del río Atoyac
UMA Estación Ambiental Tequecholapa	El Naranjal	De aventura y ecoturismo		Fosa séptica	Río Tequecholapa

Como se observa en la tabla 3, de los doce centros ecoturísticos, solo tres cuentan con ecotecnologías para tratar aguas residuales; el Centro Ecoturístico Tenochtitlán en sus habitaciones para hospedaje tienen baños secos, el Jardín de la Salud utiliza un biodigestor para tratar aguas grises y negras resultantes principalmente del

servicio de comida que ofrecen los fines de semana y Playa la Junta es el único que utiliza un HT artificial para tratar aguas grises del restaurante y del lavado de ropa.

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

Por ello, es indispensable que este tipo de empresas, dedicadas 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-visión como empresas sustentables que dependen enteramente de la calidad de los espacios naturales, y en especial en la ciudad del agua, pilar fundamental de los ecosistemas.

Conclusiones

El papel de los humedales de tratamiento en la mitigación de la contaminación del agua juega un rol importante si es considerado el diseño apropiado para el tipo y volumen del agua y con la vegetación idónea que funcione como fitorremediadora. Se ha detectado que aunque los HT comprueban su funcionalidad en la mejora de calidad del agua, su uso en México no ha sido ampliamente aplicado a problemas reales de tratamiento, sino más bien a escala laboratorio o piloto, lo cual refiere a la necesidad de incidir en políticas públicas y trabajo colaborativo entre gobierno, sociedad y academia para impulsar el uso de estas tecnologías considerando los aportes científicos como tiempo de retención hidráulica, tipo de vegetación de humedal y ornamental detectados, y que favorecen la remoción, así como la utilidad de la alternativa tanto en sectores rurales, urbanos y turísticos para mitigar la problemática de contaminación. Este estudio resulta útil para visualizar la aplicación de los estudios en el país y así establecer colaboraciones con investigadores que ya han desarrollado la estrategia.

Referencias

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.
- 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.
- 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.
- Brix, H. (1999). How 'green' are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems? *Water Science and Technology*. 40, 45-50. 104
- 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 Science and Technology*. 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.
- 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). (2013). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- De Jesús, E., Hernández-Vásquez, L.A., Alvarado-Lassman, A., Sánchez-Valera, O., Hernández-Salinas, G. (2022). *Zingiber spectabile* en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales y su uso en la agricultura. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*. 10 (1): 84-92.

- Del Toro-Sánchez, C.L., Zurita, F., Gutiérrez-Lomelí, M., Solís-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.
- 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-Muñoz, J. L. (2016). Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico? *Water Policy*. 18(3): 654-669.
- García, J. A., López, G., Torres, C. 2019. Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación sagitaria latifolia en la remoción de contaminantes básicos. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. 8(15): 1-36. DOI: 10.23913/ciba.v8i15.82
- 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.
- 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.
- 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-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.
- Hernández, M.E. & Ruiz, P. (2010). *Riparian constructed wetlands for improving water quality in a polluted river in Southeastern Mexico*. En: XVIIth World 108 Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (pp. 1-10). Québec, Canadá.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Recuperado el 8 de diciembre de 2016 de 109 <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/Default.aspx?t=mdemo13&s=est&c=17503>
- Kadlec, R.H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 35(2), 159-179
- Kadlec, R. & S. Wallace. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group
- Kadlec, R.H., Pries, J. & Lee, K. (2012). The Brighton treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 47, 56-70.
- 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.
- 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.
- Marín-Acosta, C., Solís-Silván, R., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. & Romellón-Cerino, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales 111 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, M.E.; Gallegos-Pérez, M.P.; Amaya-Tejeda, S.I. (2020). Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecological Engineering*. 147, 105658. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105658>.
- Marín-Muñiz, J.L., Zamora, S., González, D. (2024). Depuración de aguas residuales de la industria láctea con humedales construidos sembrados con policultivos de diferentes densidades de plantas ornamentales. *Universita Ciencia*. En prensa.
- 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.
- Mateo, N.; Nani, G.; Montiel, W.; Nakase, C.; Salazar-Salazar, C.; Sandoval, L. (2019). Efecto de *Canna hybrids* en humedales construidos parcialmente saturados para el tratamiento de aguas porcinas. *Rinderesu*, 4, 59–68.

- Méndez-Mendoza, A., Bello-Mendoza, R., Herrerra-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., 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.
- 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., 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
- 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.
- Mitch, W.J. & Gosselink, J.G. (2015). *Wetlands*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Mora-Orozco, C., Sucedo-Terán, R., González-Acuña, I., Gómez-Rosales, S., Flores-López, H. 2020. Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 11 (supl. 2): 1-17.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rivas, A., Barceló-Quintal, I. & Moeller, G.E. (2011). Pollutant removal in a multistage 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 frutícola con sistema de recirculación: El Zarco, Estado de México* (tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México.
- Romellón, M., Cocoltzi, E., Gaspar, L. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie. *Universita Ciencia*. 11(30): 147-162. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7843244>
- 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.
- Sandoval, L.; Zurita, F.; Del Ángel-Coronel, O.; Adame-García, J.; Marín-Muñiz, J.L. (2020). Influence of a new ornamental species (*Spathiphyllum blandum*) on the removal of COD, nitrogen, phosphorus and fecal coliforms: A mesocosm wetland study with pet and tezontle substrates. *Water Sci. Technol.* 81.5, 961–970. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.185>.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- Zapata-Morales, A., Vega-Rodríguez, S., Alfaro-De la Torre, M.C., Hernández-Morales, A., Leyva-Ramos, S., Soria-Guerra, R. (2023). Efficiency of cattail to remove a mixture of pharmaceuticals in a constructed wetland. *Journal of Chemistry and Society*. 67 (1): 1-11.
- 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-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., 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, 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.
- 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.

Posicionamiento global y tendencias técnicas de la investigación sobre humedales construidos: un análisis comparativo de México en el contexto internacional

Global Positioning and Technical Trends of Constructed Wetlands Research: A Comparative Analysis of Mexico within the International Context

Joaquín Sangabriel-Lomelí, Sergio Aurelio Zamora-Castro, Brenda Suemy Trujillo-García

Resumen

Este estudio evalúa el desarrollo global de la investigación en humedales construidos (HCs) y el posicionamiento científico de México mediante un enfoque combinado de análisis bibliométrico y caracterización técnica. Se identificaron 4719 publicaciones (2000–2025) en Scopus y Web of Science, de las cuales se analizaron 81 estudios realizados en México. Los resultados evidencian que la investigación global se concentra en un número reducido de países, liderados por China, Estados Unidos y Europa, tanto en producción científica como en implementación a gran escala. En contraste, México presenta una participación limitada, reflejando un campo en consolidación. A nivel nacional, predomina el uso de sistemas de flujo subsuperficial horizontal, con una investigación enfocada principalmente en escalas experimentales. Las aguas residuales domésticas constituyen el principal objeto de estudio, aunque existe una tendencia hacia matrices más complejas. Destaca el uso de vegetación ornamental tropical como rasgo distintivo. En conjunto, México se encuentra en una etapa de transición con alto potencial para el desarrollo de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) en contextos tropicales.

Palabras claves: Humedales construidos; Soluciones basadas en la naturaleza; Tratamiento de aguas residuales; Sistemas tropicales; Humedales híbridos; México

Abstract

Global positioning and technical trends of constructed wetland research: a comparative bibliometric and technical analysis of Mexico within the international research landscape

This study evaluates the global evolutionary trajectory of constructed wetland (CW) research and assesses Mexico's scientific standing through combined bibliometric

and technical analysis. A dataset of 4 719 publications spanning 2000–2025 was retrieved from the Scopus and Web of Science databases; 81 Mexico focused studies were selected for systematic review. Bibliometric outputs show that global constructed wetland research activity is geographically concentrated: China, the United States and European nations dominate both scientific publication output and large-scale field implementation. By contrast, Mexico exhibits comparatively low research productivity within this domain, signaling an emergent, still consolidating research field. Within Mexico, horizontal subsurface flow systems constitute the predominant technical configuration, and empirical investigations are largely restricted to laboratory and pilot scale testing. Research priorities centre principally on domestic wastewater treatment, although a growing body of work addresses more complex industrial and agricultural effluents. The deployment of tropical ornamental vegetation represents a distinctive feature of Mexican constructed wetland scholarship. Collectively, the evidence situates Mexico within a developmental transition phase with substantial untapped potential for advancing tropical context nature-based solution (NBS) innovation.

Keywords: Constructed wetlands; Nature-based solutions; Wastewater treatment; Tropical systems; Hybrid wetlands; Mexico

Introducción

El tratamiento de aguas residuales representa uno de los principales desafíos ambientales a nivel global, particularmente en un contexto de crecimiento poblacional, urbanización acelerada y presión sobre los recursos hídricos (Tella et al., 2025; Bijekar et al., 2022). En este escenario, las SbN han emergido como alternativas sostenibles que permiten integrar procesos ecológicos en el diseño de sistemas de tratamiento (Moazzem et al., 2024; Nelson et al., 2020), contribuyendo simultáneamente a la protección ambiental y al desarrollo social.

Ante esto, los HCs se han consolidado como una tecnología ampliamente utilizada para el tratamiento de aguas residuales, ya que su costo operativo es bajo, simplicidad de diseño y capacidad para remover contaminantes mediante procesos fisicoquímicos y biológicos (Brix, 2020; Rahman et al., 2020). De manera global, la investigación en este campo ha experimentado un alto crecimiento en las últimas décadas (Vymazal, 2022), impulsado por la necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles frente al impacto ambiental.

Sin embargo, la producción científica no ha sido homogénea, ya que la mayor concentración corresponde a países como China (Zhang et al., 2020), Estados Unidos y varias ciudades europeas (Junk et al., 2013), liderando tanto en términos de

publicaciones, en la implementación de sistemas a gran escala y en la generación de innovación tecnológica. Con respecto a los países en desarrollo, su participación es relativamente limitada en el panorama científico global (Fernández Ramírez et al., 2023), y aunque sus condiciones climáticas y ambientales sean altamente favorables para la aplicación de estas tecnologías.

En el caso de México, los HCs son una alternativa relevante para el tratamiento de aguas residuales, ya que pueden utilizarse en comunidades rurales y periurbanas, donde la infraestructura convencional es escasa o inexistente (García-García et al., 2016). A pesar de estas bondades, la evidencia disponible sugiere que la investigación nacional se ha desarrollado principalmente en condiciones experimentales, y con menos intensidad estudios orientados a la implementación a escala real (Lomeli et al., 2025). Esta situación plantea interrogantes sobre el grado de madurez tecnológica del país y su capacidad para transferir conocimiento científico hacia aplicaciones prácticas.

Asimismo, México presenta características distintivas que la diferencian del contexto internacional, como el uso extensivo de vegetación ornamental tropical, la adaptación de los sistemas a condiciones climáticas específicas y la creciente incorporación de configuraciones híbridas (Sandoval et al., 2019; Sandoval-Herazo et al., 2018). Esto hace ver que México tiene un enfoque propio, hacia a la integración de aspectos técnicos, ecológicos y sociales.

No obstante, existe una falta de estudios que analicen de manera integrada el posicionamiento de México dentro del contexto global, así como las tendencias técnicas que caracterizan su desarrollo científico. La mayoría de los trabajos disponibles se centran en estudios de caso o análisis experimentales aislados (Zurita, et al., 2012), sin establecer una conexión clara con el panorama internacional.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el desarrollo global de la investigación en HCs frente al crecimiento en México de estas ecotecnologías al analizar el posicionamiento científico por medio de un análisis bibliométrico y una caracterización técnica. Esto consistió en analizar la producción científica internacional junto con una clasificación detallada de los estudios desarrollados en México, considerando variables clave como tipo de HC, escala del sistema, tipo de agua residual tratada y vegetación utilizada.

Con este análisis se permitió identificar patrones dominantes, tendencias emergentes y las principales brechas de investigación y oportunidades de desarrollo en México. En particular, se busca aportar una visión crítica que contribuya a fortalecer el papel de México en el desarrollo de ecotecnologías para el tratamiento

de aguas residuales, especialmente en el marco de SbN adaptadas a condiciones tropicales.

Metodología

Diseño del estudio

Se presenta un enfoque combinado de análisis bibliométrico y revisión técnica, con el objetivo de evaluar el desarrollo global de la investigación en HCs y el posicionamiento científico de México en este campo. La metodología integra, por una parte, un análisis bibliométrico a nivel internacional y, por otra, una caracterización técnica detallada de los estudios realizados en México.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Se utilizaron las bases de datos científicas Scopus y Web of Science, seleccionadas por su amplia cobertura y rigurosidad en la indexación de literatura científica. La búsqueda se realizó utilizando la siguiente ecuación: (“constructed wetlands” OR “treatment wetlands”) AND (wastewater).

Se consideraron únicamente artículos de investigación publicados para un periodo de 2000–2025, en idioma inglés y español. Posteriormente, se eliminaron los registros duplicados entre ambas bases de datos para obtener un conjunto inicial consolidado.

Criterios de selección y depuración de la información

La selección se llevó a cabo por etapas, incluyendo la revisión de títulos, resúmenes y textos completos. Los estudios incluidos correspondían a sistemas de HCs, es decir, que integraran macrófitas, sustrato y condiciones de flujo controladas, y que evaluaran el tratamiento de aguas residuales.

Por el contrario, se excluyeron aquellos trabajos con sistemas anaerobios u otras tecnologías distintas a los HCs, estudios enfocados en la modelación sin validación experimental, investigaciones realizadas en humedales naturales, así como aquellos en los que no se especificaba claramente la configuración del sistema.

Como resultado de este proceso de depuración, se obtuvo un conjunto final de 81 estudios desarrollados en México, para su posterior análisis técnico.

Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se empleó para evaluar la distribución de la producción científica a nivel global, tanto en términos de países como de evolución temporal. Adicionalmente, se generó un mapa de relaciones entre países mediante el uso del software VOSviewer, lo que permitió identificar patrones de colaboración y concentración de la investigación en HCs.

Clasificación técnica de los estudios en México

Los 81 estudios seleccionados fueron analizados a partir de una clasificación estructurada basada en variables técnicas clave. En primer lugar, se consideró el tipo de humedal, diferenciando entre sistemas de flujo subsuperficial horizontal (HSSF), flujo subsuperficial vertical (VSSF), sistemas híbridos y humedales de flujo superficial (FWS). En segundo lugar, se clasificó la escala del sistema en laboratorio, piloto y escala real.

Asimismo, se analizó el tipo de agua residual tratada, incluyendo aguas domésticas, industriales, agrícolas, mixtas y sintéticas o experimentales. Finalmente, se evaluó el tipo de vegetación utilizada, distinguiendo entre especies ornamentales tropicales, macrófitas convencionales como *Typha* y *Phragmites*, sistemas de policultivos y sistemas sin vegetación o utilizados como controles. La asignación de cada categoría se realizó con base en las características predominantes reportadas en cada estudio.

Resultados y Discusión

Tendencias globales de investigación y posicionamiento científico de México

La producción científica en HCs para el tratamiento de aguas residuales ha experimentado un crecimiento sostenido y acelerado en las últimas dos décadas, reflejando el creciente interés global en soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, México contribuyó con 81 publicaciones (Tabla 1), lo que representa aproximadamente el 1.72% de la producción científica global. Esta participación relativamente baja indica que, si bien el país forma parte del desarrollo científico en este campo, su contribución sigue siendo limitada en comparación con las principales naciones productoras.

Tabla 1. Producción científica global vs México

Posición	País	Publicaciones	% del total
1	China	1398	28.7
2	USA	594	12.5
3	España	326	6.76
4	India	297	6.08
5	Brasil	194	4.01
20	México	81	1.72

Distribución global de la producción científica

El análisis de la producción científica por país revela una marcada concentración de publicaciones en un número reducido de naciones. China se posiciona como el principal actor global, con el 28.7% del total de publicaciones, seguido por Estados Unidos (12.5%), España (6.76%), India (6.08%) y Brasil (4.01%) (Figura 1). En conjunto, estos países concentran una proporción significativa de la literatura científica en el área de humedales construidos.

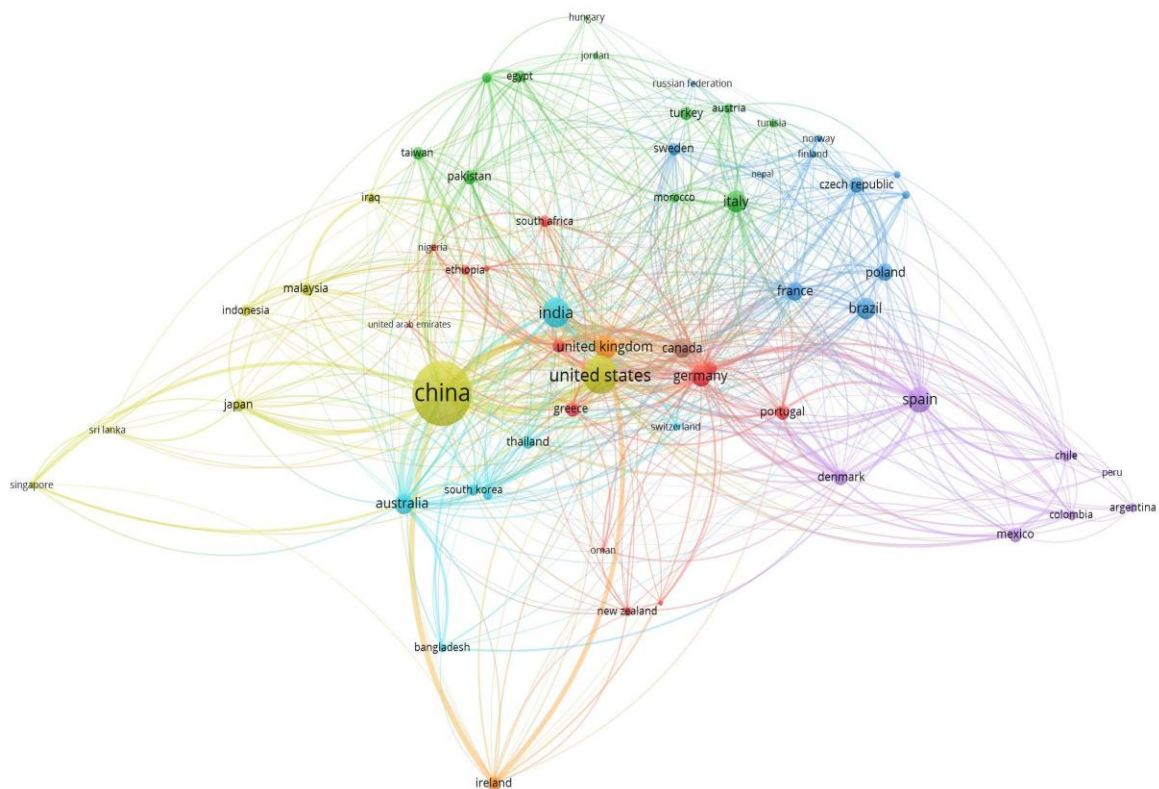


Figura 1. Distribución de los estudios por país

Este liderazgo puede explicarse por una combinación de factores, entre los que destacan la inversión sostenida en investigación ambiental, el desarrollo tecnológico y la implementación de sistemas a gran escala. En contraste, México ocupa la posición 20 a nivel mundial, lo que evidencia un rol aún en consolidación dentro de este campo de investigación.

Evolución temporal de las publicaciones

El análisis temporal muestra una tendencia claramente ascendente en la producción científica global, particularmente a partir de 2010, periodo en el que se observa una intensificación significativa de la actividad investigativa. Este crecimiento se encuentra estrechamente relacionado con el fortalecimiento de políticas ambientales, el incremento en la preocupación por el cambio climático y la promoción de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

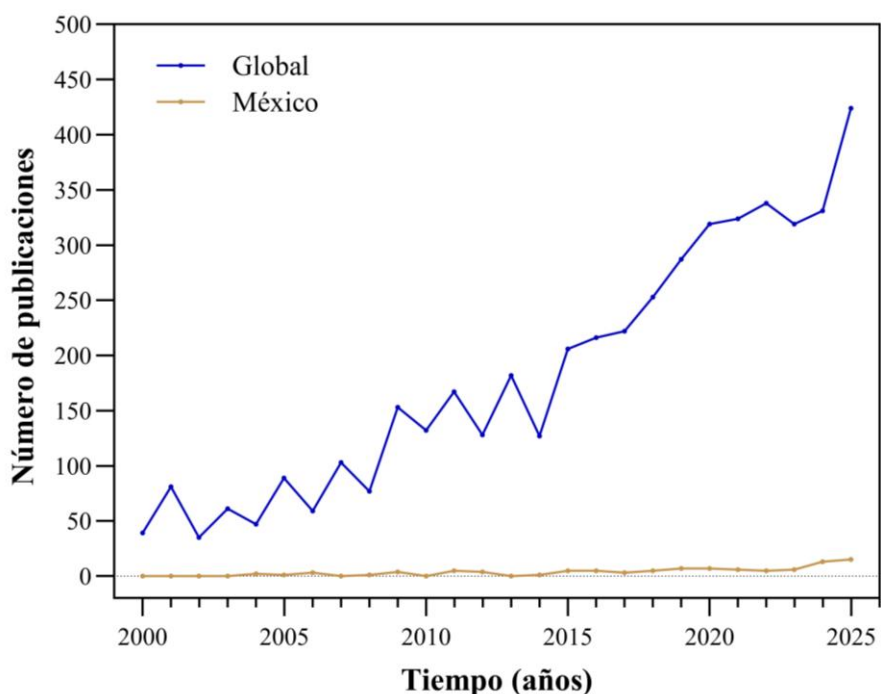


Figura 2. Evolución temporal de la producción científica global y nacional

En el caso de México, se observa una tendencia similar, aunque menos pronunciada y con mayor variabilidad a lo largo del tiempo. Este comportamiento sugiere un proceso de consolidación más lento en comparación con los países líderes, indicando que el desarrollo científico nacional en este campo aún se encuentra en una etapa de maduración.

Caracterización técnica de la investigación en humedales construidos en México

La síntesis cuantitativa de los 81 estudios se presenta en la Tabla 2, permitiendo identificar de manera estructurada los patrones tecnológicos predominantes en la investigación nacional, mientras que la clasificación detallada de los estudios analizados se presenta en el Apéndice A (Tabla A1).

Tabla 2. Clasificación detallada de los estudios de HCs analizados en México (n = 81), incluyendo configuración del sistema, escala, tipo de vegetación y características de las aguas residuales

Autor (Año)	Tipo de humedal	Escala	Vegetación	Tipo de agua
Nani et al. (2024)	HSSF	Piloto	Ornamentales (<i>Alpinia</i> , <i>Heliconia</i> , <i>Strelitzia</i>)	Doméstica
Zurita et al. (2008)	HSSF / VSSF	Piloto	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Doméstica
Lomelí et al. (2025)	Híbrido (HSSF + VSSF)	Escala real	Ornamentales (policultivo)	Doméstica
Castellanos-Rivera et al. (2025)	HSSF	Piloto	<i>Heliconia</i> + <i>Typha</i>	Industrial (rastros)
Gallegos-Castro et al. (2025)	Híbrido (FWS + HSSF + lagunas)	Escala real	<i>Eichhornia</i> , <i>Cyperus</i>	Doméstica (fármacos)
Aguilar et al. (2025)	HSSF	Piloto	<i>Heliconia</i> , <i>Hippeastrum</i>	Doméstica
Hernández-Castelán et al. (2024)	VSSF (parcialmente saturado)	Piloto	<i>Typha</i> + <i>Heliconia</i>	Mixta (lixiviados + doméstica)
Vega et al. (2024)	HSSF	Piloto	<i>Canna</i>	Doméstica
Marín-Muñiz et al. (2024)	VSSF	Laboratorio (microcosmos)	Ornamentales (<i>Heliconia</i> , <i>Etlingera</i> , <i>Spathiphyllum</i>)	Doméstica
Vásquez et al. (2023)	FWS (islas flotantes)	Laboratorio	<i>Eichhornia crassipes</i>	Doméstica (lavandería)
Herazo et al. (2023)	HSSF	Escala real	Ornamentales (<i>Canna</i> , <i>Spathiphyllum</i> , <i>Typha</i>)	Doméstica
Montoya et al. (2023)	HSSF + VSSF	Piloto	<i>Arundo donax</i> , <i>Iris</i>	Industrial (vinazas + doméstica)

Autor (Año)	Tipo de humedal	Escala	Vegetación	Tipo de agua
Viveros et al. (2022)	VSSF (PSV + FFV)	Piloto	<i>Heliconia</i>	Mixta (doméstica + porcina)
De Lille et al. (2021)	Híbrido (HSSF + VSSF)	Piloto	<i>Typha, Sagittaria</i>	Doméstica
Sandoval-Herazo et al. (2021)	HSSF	Escala real	<i>Typha, Canna</i>	Industrial (porcina)
García-Aburto et al. (2025)	Híbrido (HSSF + VSSF)	Piloto	<i>Heliconia, Phragmites</i>	Doméstica (contaminantes BTEX)
Fuentes-Clemente et al. (2025)	HSSF	Laboratorio	<i>Canna sp.</i>	Doméstica
Nakase et al. (2019)	VSSF (parcialmente saturado)	Laboratorio (mesocosmos)	<i>Canna, Zantedeschia</i>	Doméstica
Zamora-Castro et al. (2019)	VSSF (fill & drain)	Laboratorio	Ornamentales (<i>Canna, Pontederia, Spathiphyllum</i>)	Doméstica
Hernández-Cardona et al. (2025)	VSSF	Laboratorio	<i>Typha dominguensis</i>	Doméstica (fármacos)
Sandoval-Herazo et al. (2018)	HSSF	Laboratorio	Ornamentales (<i>Lavandula, Spathiphyllum, Zantedeschia</i>)	Doméstica
Marín-Muñiz et al. (2024)	HSSF	Laboratorio (mesocosmos)	Ornamentales (<i>Canna, Dieffenbachia</i>)	Doméstica
Marín-Muñiz et al. (2024)	HSSF	Laboratorio	Ornamentales (<i>Canna, Alpinia, Hedychium</i>)	Doméstica
Salgado et al. (2018)	HSSF	Laboratorio	<i>Typha</i> (con rizobacterias)	Doméstica
Salinas-Juárez et al. (2024)	HSSF (CW-MFC)	Laboratorio	<i>Typha latifolia</i>	Sintética / experimental

Autor (Año)	Tipo de humedal	Escala	Vegetación	Tipo de agua
Mateo-Díaz et al. (2023)	HSSF	Piloto	<i>Heliconia, Hippeastrum</i>	Mixta (láctea + doméstica)
Martínez et al. (2015)	Híbrido (HSSF + VSSF + lagunas)	Piloto	<i>Zantedeschia aethiopica</i> y <i>Strelitzia reginae</i>	Doméstica
Giácoman-Vallejos et al. (2015)	HSSF	Piloto	<i>Typha</i> spp.	Mixta (doméstica + porcina)
González-Moreno et al. (2021)	VSSF (parcialmente saturado, bioeléctrico)	Piloto	<i>Canna, Zantedeschia</i>	Doméstica
Hernández et al. (2017)	FWS + SSF	Piloto	<i>Zantedeschia, Cyperus</i> y <i>Typha</i>	Mixta (río contaminado)
Guadarrama-Pérez et al. (2022)	CW-MFC (híbrido)	Laboratorio	Ornamentales	Sintética
Cedillo-Herrera et al. (2020)	Híbrido (CW + UV/H ₂ O ₂)	Piloto	<i>Phragmites</i>	Agrícola (plaguicidas)
Sandoval et al. (2020)	HSSF	Laboratorio (mesocosmos)	<i>Spathiphyllum</i>	Doméstica
Zurita et al. (2011)	HSSF + VSSF	Piloto	Ornamentales	Doméstica
Rivas et al. (2011)	Híbrido (HSSF + VSSF + laguna)	Escala real	<i>Typha latifolia</i> y <i>Phragmites australis</i>	Doméstica
Zurita et al. (2009)	HSSF + VSSF	Piloto	Ornamentales	Doméstica
González et al. (2009)	HSSF	Piloto	Ornamentales	Industrial (porcina)
Gutiérrez-Sarabia et al. (2004)	HSSF (en sistema en serie)	Escala real	<i>Phragmites australis</i> y <i>Typha latifolia</i>	Industrial (rastro)
Ríos-Montes et al. (2017)	HSSF	Piloto	<i>Phragmites australis</i>	Agrícola (pesticidas)
Zamora-Castro et al. (2025)	HSSF	Piloto	Ornamentales (<i>Canna, Zingiber, Alpinia</i>)	Doméstica
Herrera-Cárdenas et al. (2016)	HSSF	Laboratorio (mesocosmos)	<i>Typha, Phragmites, Cyperus</i>	Doméstica (micropoluentes)

Autor (Año)	Tipo de humedal	Escala	Vegetación	Tipo de agua
Payán-Villalva et al. (2025)	HSSF	Piloto	No especificado	Industrial (acuacultura)
Monteagudo-Hernández et al. (2024)	Híbrido (VSSF + HSSF)	Piloto	Ornamentales (<i>Canna</i> , <i>Heliconia</i>)	Industrial (porcina)
Ruiz et al. (2025)	HSSF	Laboratorio	<i>Arundo donax</i>	Doméstica
Arciniega-Galaviz et al. (2024)	FWS	Piloto	<i>Eichhornia crassipes</i>	Doméstica
Vergara-Flórez et al. (2023)	HSSF	Piloto	<i>Thalia geniculata</i>	Doméstica
Fernández-Echeverría et al. (2022)	HSSF	Piloto	<i>Heliconia latispatha</i>	Mixta (porcina + doméstica)
Garibay et al. (2021)	HSSF (integrado en sistema)	Escala real	<i>Agapanthus africanus</i>	Doméstica
Herazo et al. (2021)	HSSF	Piloto	<i>Heliconia</i> , <i>Typha</i> , <i>Cyperus</i>	Mixta (porcina + doméstica)
Zamora et al. (2019)	HSSF	Laboratorio (microcosmos)	Ornamentales (<i>Canna</i> , <i>Cyperus</i> , <i>Hedychium</i>)	Doméstica
del Castillo et al. (2020)	HSSF (en sistema combinado)	Escala real	<i>Agapanthus africanus</i>	Doméstica
Sandoval et al. (2019)	VSSF (fill & drain)	Laboratorio	Ornamentales	Doméstica
Sandoval-Herazo et al. (2020)	HSSF	Laboratorio	Ornamentales (<i>Canna</i> , <i>Alpinia</i> , <i>Hedychium</i>)	Doméstica
Marín-Muñiz et al. (2018)	VSSF	Laboratorio (microcosmos)	<i>Typha</i> , <i>Zantedeschia</i> , <i>Alpinia</i>	Doméstica
Zamora et al. (2019)	HSSF	Laboratorio	Ornamentales (<i>Spathiphyllum</i> , <i>Hedychium</i>)	Doméstica
Zurita & White (2014)	Híbrido (HF + VF + lagunas)	Piloto	<i>Zantedeschia aethiopica</i> y <i>Canna indica</i>	Doméstica
Zapata-Morales et al. (2024)	HSSF	Laboratorio	<i>Typha latifolia</i>	Doméstica (fármacos)

Autor (Año)	Tipo de humedal	Escala	Vegetación	Tipo de agua
Belmont et al. (2004)	Híbrido (SSF + VF + laguna)	Piloto	Ornamentales + <i>Typha</i>	Doméstica
Guadarrama-Pérez et al. (2023)	CW-MFC (híbrido electroquímico)	Laboratorio	<i>Juncus effusus</i>	Sintética
Ramírez et al. (2005)	HSSF	Escala real (doméstico)	<i>Phragmites australis</i>	Doméstica
Pacheco-Aguilar et al. (2012)	HSSF	Laboratorio	Microorganismos (sin planta dominante)	Industrial (curtiduría)
García-Prieto et al. (2022)	Híbrido (lagunas + CW)	Piloto	No especificado	Doméstica
Bustamante et al. (2011)	VSSF	Laboratorio	<i>Phragmites australis</i>	Sintética
Amabilis-Sosa et al. (2016)	HSSF	Laboratorio	<i>Phragmites australis</i>	Industrial (mercurio)
Vidales-Contreras et al. (2006)	FWS	Escala real	<i>Scirpus spp.</i> y <i>Typha domingensis</i>	Doméstica
Zurita & Carreón (2015)	Híbrido (HSSF + VSSF)	Piloto	<i>Zantedeschia aethiopica</i> y <i>Strelitzia reginae</i>	Doméstica
Amabilis-Sosa et al. (2015)	HSSF	Laboratorio	<i>Phragmites australis</i>	Industrial (metales pesados)
Vidales-Contreras et al. (2012)	HSSF	Laboratorio	Arbustos herbáceos y árboles	Doméstica
Tejeda et al. (2022)	VSSF (microcosmos)	Laboratorio	<i>Canna</i> , <i>Cyperus</i> , <i>Typha</i> , <i>Iris</i>	Industrial (vinazas)
Estrada-Loredo et al. (2025)	FWS	Laboratorio	<i>Schoenoplectus</i> , <i>Phragmites</i>	Industrial (salina)
de Anda et al. (2018)	HSSF	Piloto	<i>Agapanthus</i>	Doméstica
Sosa-Rodríguez et al. (2024)	FWS	Piloto	<i>Eichhornia</i> , <i>Lemna</i>	Doméstica
Zúñiga et al. (2016)	HSSF	Escala real	Ornamentales papyrus	+ Doméstica
Zurita et al. (2006)	HSSF	Laboratorio	Ornamentales	Doméstica

Autor (Año)	Tipo de humedal	Escala	Vegetación	Tipo de agua
Moeder et al. (2017)	FWS (zanja vegetada)	Escala real	<i>Typha domingensis</i>	Mixta (agrícola + doméstica)
Romero-Aguilar et al. (2009)	HSSF	Piloto	<i>Phragmites, Typha</i>	Doméstica
Pérez-López et al. (2009)	HSSF	Laboratorio	<i>Schoenoplectus, Eleocharis</i>	Doméstica
Roé-Sosa et al. (2019)	Híbrido (VSSF + HSSF)	Piloto	<i>Typha latifolia</i>	Agrícola
Sandoval et al. (2020)	HSSF	Laboratorio	<i>Spathiphyllum blandum</i>	Doméstica
Vidales-Contreras et al. (2015)	FWS	Escala real	<i>Scirpus spp. y typha domingensis</i>	Doméstica

Tipo de humedal

El análisis revela un claro predominio de los sistemas HSSF, los cuales representan aproximadamente el 61.7% de los estudios analizados (Tabla 2). Esta tendencia confirma que los HSSF constituyen la configuración más utilizada en México, debido a su simplicidad operativa, estabilidad hidráulica y capacidad para mantener condiciones anaerobias y facultativas favorables para la remoción de materia orgánica y nutrientes (Ahmed, 2025; Saeed & Sun, 2017).

En contraste, los sistemas VSSF y las configuraciones híbridas presentan una participación similar ($\approx 17.3\%$ cada uno), lo que indica una diversificación progresiva en el diseño de sistemas. Los VSSF han sido implementados principalmente en estudios experimentales enfocados en mejorar la transferencia de oxígeno y la eliminación de nitrógeno (Hernández-Cardona et al., 2025; Marín-Muñoz et al., 2024; Zamora-Castro et al., 2019; Sandoval et al., 2019; Bustamante et al., 2011), mientras que los sistemas híbridos han sido propuestos como una alternativa para integrar las ventajas de ambas configuraciones y optimizar la eficiencia global del tratamiento (Lomelí et al., 2025; Gallegos-Castro et al., 2025; Montoya et al., 2023; De Lille et al., 2021; Zurita & White, 2014; Zurita et al., 2011).

Por otro lado, los FWS representan una proporción menor ($\sim 3.7\%$), lo cual puede atribuirse a su mayor requerimiento de área y a limitaciones en el control de

condiciones operativas. No obstante, su uso sigue siendo relevante en contextos específicos, particularmente en sistemas de bajo costo y aplicaciones ecológicas.

Escala del sistema

En términos de escala, la investigación en México se caracteriza por una fuerte concentración en estudios de laboratorio ($\approx 48.1\%$) y piloto ($\approx 35.8\%$), mientras que los sistemas a escala real representan aproximadamente el 16% de los casos (Tabla 2). Este patrón evidencia una brecha significativa entre el desarrollo experimental y la implementación práctica de los HCs en el país.

Los estudios a escala de laboratorio, frecuentemente desarrollados bajo condiciones controladas mediante microcosmos o mesocosmos, han permitido evaluar variables específicas como tipo de sustrato, densidad de vegetación, mecanismos de remoción y comportamiento de contaminantes emergentes. Sin embargo, estos sistemas tienden a simplificar las condiciones hidráulicas y biogeoquímicas presentes en sistemas reales (Vymazal, 2018), lo que puede conducir a una sobreestimación de la eficiencia de remoción.

Por su parte, los estudios a escala piloto han facilitado la transición hacia condiciones más cercanas a la operación real, incorporando factores como variabilidad climática, carga hidráulica y dinámica de flujo. No obstante, la limitada cantidad de investigaciones a escala real indica que la adopción de esta tecnología en México aún se encuentra en una etapa de consolidación.

A pesar de ello, estudios recientes han demostrado la viabilidad de sistemas a gran escala bajo condiciones tropicales (Lomelí et al., 2025; Gallegos-Castro et al., 2025), evidenciando que los HCs pueden cumplir con la normativa ambiental vigente y operar de manera eficiente en contextos reales. Estos avances sugieren un proceso de transición hacia aplicaciones más robustas y sostenibles.

Tipo de agua residual

El análisis del tipo de agua residual tratada muestra una clara dominancia de estudios enfocados en aguas domésticas ($\approx 61.7\%$), lo cual refleja la prioridad de atender problemáticas relacionadas con el saneamiento básico, particularmente en comunidades rurales y periurbanas.

En menor proporción, se identifican estudios orientados al tratamiento de efluentes industriales ($\approx 16\%$), incluyendo aguas residuales provenientes de rastros (Castellanos-Rivera et al., 2025); Gutiérrez-Sarabia et al., 2004), granjas porcinas

(Sandoval-Herazo et al., 2021; Viveros et al., 2022; Monteagudo-Hernández et al., 2024; Herazo et al., 2021), vinazas (Montoya et al., 2023; Tejeda et al., 2022) y procesos industriales específicos. Asimismo, los sistemas que tratan aguas mixtas ($\approx 11\%$) y agrícolas ($\approx 6\%$) evidencian una expansión hacia matrices más complejas.

Un aspecto relevante es la creciente inclusión de contaminantes emergentes, tales como fármacos (Hernández-Cardona et al., 2025; Zapata-Morales et al., 2024), metales pesados (Amabilis-Sosa et al., 2016) y compuestos orgánicos persistentes, lo que refleja una evolución en las líneas de investigación hacia problemáticas ambientales más complejas y contemporáneas. Sin embargo, su representación aún es limitada en comparación con estudios convencionales.

Vegetación utilizada

Uno de los hallazgos más relevantes del análisis es el predominio del uso de plantas ornamentales tropicales, las cuales representan una característica distintiva de la investigación en México. En los estudios analizados, especies como *Canna indica*, *Heliconia spp.*, *Zantedeschia aethiopica*, *Spathiphyllum spp.* y *Alpinia spp.* han sido ampliamente utilizadas, tanto en sistemas de monocultivo como en configuraciones de policultivos.

Este patrón evidencia una tendencia hacia la integración de criterios estéticos y funcionales en el diseño de HCs, lo cual contrasta con el enfoque predominante a nivel internacional, donde especies como *Typha latifolia* y *Phragmites australis* constituyen la base de la mayoría de los sistemas. No obstante, en el contexto nacional estas especies también se emplean, frecuentemente en combinación con vegetación ornamental, lo que sugiere una adaptación de los diseños a condiciones locales y objetivos específicos de tratamiento.

Asimismo, la presencia de sistemas con policultivos en diversos estudios nos indica un alto interés en optimizar la diversidad funcional dentro de los HCs, favoreciendo interacciones en conjunto (sinérgicas) con el fin de la mejorar en la remoción de contaminantes y a la estabilidad del sistema.

Discusión comparativa: México en el contexto global de la investigación en HCs

La integración del análisis global (Sección 3.1) y la caracterización técnica de los estudios desarrollados en México (Sección 3.2) nos permite establecer una evaluación comparativa del posicionamiento científico y tecnológico del país en el campo de los HCs.

De manera internacional, la investigación en HCs se ha orientado hacia la implementación de sistemas a gran escala, el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas y la consolidación de estrategias de transferencia de conocimiento. Este enfoque permite a los países líderes incrementar su producción científica, generando aplicaciones operativas robustas en contextos urbanos, industriales y ambientales complejos.

Sin embargo, en México se refleja una dinámica distinta, en la cual el énfasis se ha centrado en la comprensión de los procesos de tratamiento y la validación de configuraciones bajo condiciones controladas. Esto no implica una falta de desarrollo, sino en la etapa de madurez tecnológica, donde la generación de conocimiento se enfoca en experimentaciones previas (laboratorio o piloto) a su implementación a gran escala.

Configuración tecnológica y profundidad de implementación

Las configuraciones empleadas en México son consistentes con las tendencias internacionales, particularmente en el uso de sistemas de flujo subsuperficial y la incorporación de configuraciones híbridas. Sin embargo, se diferencian en la profundidad de su implementación.

A nivel global, los sistemas híbridos y otras configuraciones avanzadas se basan ampliamente en la integración de aplicaciones a gran escala, mientras que en México su desarrollo se concentra principalmente en estudios experimentales o piloto. Esta situación evidencia una brecha entre el diseño conceptual y su aplicación operativa.

Complejidad de los efluentes y alcance de la investigación

La investigación en HCs ha evolucionado hacia el tratamiento de aguas residuales complejas, como lo son las industriales, lixiviados o contaminantes emergentes. Este avance refleja una ampliación del alcance de la tecnología hacia problemáticas ambientales de mayor complejidad.

En México, aunque se observa una diversificación que va en aumento para los tipos de agua residual estudiados, el mayor enfoque continúa siendo para el tratamiento de aguas domésticas. Aunque esto responde a necesidades prioritarias de saneamiento del país, también limita la expansión de la investigación hacia sectores industriales estratégicos, lo que representa una oportunidad clara de desarrollo futuro.

Adaptación ecológica y diferenciación tecnológica

Lo que caracteriza a México es su enfoque en la adaptación de los sistemas a condiciones tropicales, particularmente a través del uso de vegetación ornamental. Esta estrategia introduce una dimensión adicional al diseño de HCs, al integrar criterios estéticos, ecológicos y sociales con la eficiencia del tratamiento.

En comparación con el enfoque internacional, basado predominantemente en especies convencionales, la incorporación de vegetación ornamental representa una contribución relevante que posiciona a México como un referente potencial en el desarrollo de SbN adaptadas a contextos tropicales.

Brecha entre investigación y aplicación

El análisis comparativo confirma la existencia de una brecha estructural entre el desarrollo científico y la implementación tecnológica en México. Mientras que los países líderes han logrado consolidar sistemas operativos a gran escala, en México la investigación se mantiene mayoritariamente en etapas experimentales.

Sin embargo, la evidencia reciente de sistemas implementados en condiciones reales sugiere que esta brecha está comenzando a reducirse. Este proceso de transición es una oportunidad estratégica que permitirá fortalecer la adopción de HCs como soluciones sostenibles en el país.

Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar el desarrollo global de la investigación en HCs y el posicionamiento científico de México combinando el análisis bibliométrico y la caracterización técnica.

Los resultados evidencian que la investigación en este campo está concentrada en un número reducido de países, que han logrado consolidar una producción científica e implementado de forma efectiva sistemas de HCs a gran escala. En este contexto, México se posiciona como un actor emergente, cuya contribución, aunque limitada en términos cuantitativos, refleja avances relevantes en el desarrollo de conocimiento técnico.

A nivel nacional, la investigación generada va enfocada a tendencias internacionales en cuanto a configuraciones tecnológicas. Sin embargo, se diferencia en el nivel de aplicación, por la predominancia aún en etapas experimentales, mostrando una brecha entre la generación de conocimiento y su implementación operativa.

Sin embargo, el enfoque adoptado en el país muestra características únicas distintivas, por la adaptación de los sistemas a condiciones tropicales y en la

integración de vegetación ornamental, lo que representa una contribución relevante dentro del marco de las SbN. Este enfoque no solo responde a condiciones ambientales específicas, sino que también incorpora dimensiones sociales y ecológicas que fortalecen el potencial de aplicación.

En conjunto, los hallazgos indican que México se encuentra en una etapa de transición tecnológica, en la que coexisten avances científicos con limitaciones estructurales asociadas a la escalabilidad, la diversificación de aplicaciones y la consolidación de estrategias de implementación.

En este sentido, el fortalecimiento del posicionamiento del país en el ámbito internacional dependerá de la capacidad para impulsar la investigación aplicada, ampliar el desarrollo de sistemas a gran escala y promover la colaboración científica. Asimismo, la diversificación hacia el tratamiento de efluentes más complejos y la integración de variables ambientales en el diseño de sistemas representan líneas estratégicas para el desarrollo futuro.

Referencias

- Ahmed, A. M. (2025). Comparative analysis of vertical and horizontal subsurface flow constructed wetlands for eutrophication mitigation. *Al-Bahir Journal for Engineering and Pure Sciences*. 6(2):2.
- Amabilis-Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G. y Del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. (2015). Accumulation and distribution of lead and chromium in laboratory-scale constructed wetlands inoculated with metal-tolerant bacteria. *International Journal of Phytoremediation*. 17(11):1090-1096.
- Amabilis-Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G. y Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. C. (2016). Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(1):47-53.
- Arciniega-Galaviz, M. A., Ávila-Díaz, J. A. y Hernández-Sandoval, P. (2024). Evaluación de un humedal artificial piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas: fitorremediación con *Eichhornia crassipes*. *Ra Ximhai*. 20:1-10.
- Belmont, M. A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A. y Metcalfe, C. D. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering*. 23(4-5):299-311.
- Bijekar, S., Padariya, H. D., Yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A. y Awwad, N. S. et al. (2022). The state of the art and emerging trends in wastewater treatment in developing nations. *Water*. 14(16):2537.

- Brix, H. (2020). Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. p. 9-22. In: *Constructed wetlands for water quality improvement*. CRC Press.
- Bustamante, M. A. O., Mier, M. V., Estrada, J. A. E. y Domínguez, C. D. (2011). Nitrogen and potassium variation on contaminant removal for a vertical subsurface flow lab scale constructed wetland. *Bioresource Technology*. 102(17):7745-7754.
- Castellanos-Rivera, J., Hernández-Vásquez, L. A., Nani, G., Zurita, F., Dajud, G. B. y Herazo, M. S. et al. (2025). Slaughterhouse wastewater treatment using constructed wetlands with monocultures and polycultures of *Heliconia latispatha* and *Typha latifolia*. *Journal of Water Process Engineering*. 76:108306.
- Cedillo-Herrera, C. I. G., Roé-Sosa, A., Pat-Espadas, A. M., Ramírez, K., Rochín-Medina, J. y Amabilis-Sosa, L. E. (2020). Efficient malathion removal in constructed wetlands coupled to UV/H₂O₂ pretreatment. *Applied Sciences*. 10(15):5306.
- De Anda, J., López-López, A., Villegas-García, E. y Valdivia-Aviña, K. (2018). High-strength domestic wastewater treatment and reuse with onsite passive methods. *Water*. 10(2):99.
- De Lille, M. V., Cardona, M. H., Xicum, Y. T., Giacomán-Vallejos, G. y Quintal-Franco, C. (2021). Hybrid constructed wetlands system for domestic wastewater treatment under tropical climate: Effect of recirculation strategies on nitrogen removal. *Ecological Engineering*. 166:106243.
- Del Castillo, A. F., Garibay, M. V., Senés-Guerrero, C., Yebra-Montes, C., De Anda, J. y Gradilla-Hernández, M. S. (2020). Mathematical modeling of a domestic wastewater treatment system combining a septic tank, an up flow anaerobic filter, and a constructed wetland. *Water*. 12(11):3019.
- Estrada-Loredo, S. J., Cisneros-Almazán, R., Soto-Peña, G. A., Hernández-Morales, A. y Del Socorro Santos-Díaz, M. (2025). Effects of *Schoenoplectus americanus* (Pers.) Volkart ex Schinz & R. Keller and *Phragmites australis* (Cav.) on the water quality improvement of moderately saline wastewater. *Wetlands*. 45(6).
- Fernández-Echeverría, E., Herazo, L. S., Zurita, F., Betanzo-Torres, E. y Sandoval-Herazo, M. (2022). Development of *Heliconia latispatha* in constructed wetlands for the treatment of swine/domestic wastewater in tropical climates, with PET as a substitute for the filter medium. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 21(2):1-20.
- Fernández Ramírez, L. E., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Herazo, L. C., Herrera-May, A. L., Salgado-Estrada, R. y De La Cruz-Dessavre, D. A. (2023). Technological innovations in the application of constructed wetlands: a review. *Processes*. 11(12): 3334.
- Fuentes-Clemente, H. D. J., Enciso-Sáenz, S., Castañón-González, J. H. y Villalobos-Maldonado, J. J. (2025). Adaptación de *Canna* sp. al uso de material estabilizado como sustrato en humedales artificiales. *Terra Latinoamericana*. 43:1-10.

- Gallegos-Castro, E., Almeida-Naranjo, C. E., Rivas, A., Figueroa, N., Montellano, L. y Villamar-Ayala, C. A. (2025). The removal of acidic drugs from domestic wastewater using an innovative system of constructed wetlands/stabilization ponds in series. *Water*. 17(8):1192.
- García-Aburto, S. G., Nani, G., Vergara-Flórez, V., Reyes-González, D., Betanzo-Torres, E. A. y Peralta-Vega, A. et al. (2025). Phytoengineered remediation of BTEX and MTBE through hybrid constructed wetlands planted with *Heliconia latispatha* and *Phragmites australis*. *Ecologies*. 6(4):84.
- García-García, P. L., Ruelas-Monjardín, L. y Marín-Muñiz, J. L. (2016). Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico? *Water Policy*. 18(3):654-669.
- García-Prieto, J. C., Núñez-Núñez, C. M., Proal-Nájera, J. B. et al. (2022). Study of coliforms and *Clostridium* bacteria inactivation in wastewaters by a pilot photolysis process and by the maturation lagoons of a low-cost nature-based WWTP. *Environmental Science and Pollution Research*. 29:35484-35499.
- Garibay, M. V., Del Castillo, A. F., Torres, O. D., De Anda, J., Yebra-Montes, C. y Senés-Guerrero, C. et al. (2021). Characterization of the spatial variation of microbial communities in a decentralized subtropical wastewater treatment plant using passive methods. *Water*. 13(9):1157.
- Giácoman-Vallejos, G., Ponce-Caballero, C. y Champagne, P. (2015). Pathogen removal from domestic and swine wastewater by experimental constructed wetlands. *Water Science & Technology*. 71(8):1263-1270.
- González Zurita, J. y García Barrios, R. (2016). Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(2):199-211.
- González-Moreno, H. R., Marín-Muñiz, J. L., Sánchez-Dela-Cruz, E., Nakase, C., Del Ángel-Coronel, O. A. y Reyes-González, D. et al. (2021). Bioelectricity generation and production of ornamental plants in vertical partially saturated constructed wetlands. *Water*. 13(2):143.
- Guadarrama-Pérez, O., Bahena-Rabadán, K. Y., Dehesa-Carrasco, U., Guadarrama Pérez, V. H. y Estrada-Arriaga, E. B. (2022). Bioelectricity production using shade macrophytes in constructed wetlands-microbial fuel cells. *Environmental Technology*. 43(10):1532-1543.
- Guadarrama-Pérez, O., Bustos-Terrones, V., Guadarrama-Pérez, V. H., Guillén-Garcés, R. A., Hernández-Romano, J. y Treviño-Quintanilla, L. G. et al. (2023). Variation of graphene/titanium dioxide concentration as electrocatalyst for an oxygen reduction reaction in constructed wetland-microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*. 157:107618.
- Gutiérrez-Sarabia, A., Fernández-Villagómez, G., Martínez-Pereda, P., Rinderknecht-Seijas, N. y Poggi-Varaldo, H. M. (2004). Slaughterhouse wastewater treatment in a

- full-scale system with constructed wetlands. *Water Environment Research*. 76(4):334-343.
- Herazo, L. C. S., Zurita, F., Nani, G., Del Ángel-Coronel, O. A. y Aguilar, F. A. A. (2021). Treatment of swine effluent mixed with domestic wastewater and vegetation development in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow wetlands. *Ecological Engineering*. 173:106432.
- Hernández, M. E., Galindo-Zetina, M. y Carlos, H. J. (2017). Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. *Ecological Engineering*. 114:88-95.
- Hernández-Castelán, D. A., Zurita, F., Marín-Peña, O., Betanzo-Torres, E. A., Sandoval-Herazo, M. y Castellanos-Rivera, J. et al. (2024). Effect of monocultures and polycultures of *Typha latifolia* and *Heliconia psittacorum* on the treatment of river waters contaminated with landfill leachate/domestic wastewater in partially saturated vertical constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*. 26(13): 2163-2174.
- Hernández-Cardona, M. A., Giacomán-Vallejos, G., Vega-De-Lille, M. I., Méndez-Novelo, R. I., González-Sánchez, A. A. y Hernández-Núñez, E. et al. (2025). Enhanced removal of ibuprofen, paracetamol, and caffeine in vertical constructed wetlands using biochar and zeolite as support media. *Processes*. 13(11):3679.
- Herrera-Cárdenas, J., Navarro, A. E. y Torres, E. (2016). Effects of porous media, macrophyte type and hydraulic retention time on the removal of organic load and micropollutants in constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 51(5):380-388.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Květ, J. y Mitchell, S. A. et al. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*. 75(1):151-167.
- Lomeli, J. S., Zamora-Castro, S. A., Zamora-Lobato, T., Sandoval-Herazo, E. J., Adame-García, J. y Zurita, F. et al. (2025). Performance of large-scale ornamental wetlands for municipal wastewater treatment: A case study in a polluted estuary in the Gulf of Mexico. *Sustainability*. 17(5):2120.
- Marín-Muñiz, J. L., García-González, M. C., Ruelas-Monjardín, L. C. y Moreno-Casasola, P. (2017). Influence of different porous media and ornamental vegetation on wastewater pollutant removal in vertical subsurface flow wetland microcosms. *Environmental Engineering Science*. 35(2):88-94.
- Marín-Muñiz, J. L., Hernández, M. E. y Zamora-Castro, S. (2024). Ornamental plant growth in different culture conditions and fluoride and chloride removals with constructed wetlands. *Hydrology*. 11(11):182.
- Marín-Muñiz, J. L., Ortega-Pineda, G., Zitácuaro-Contreras, I., Vidal-Álvarez, M., Martínez-Aguilar, K. E. y Álvarez-Hernández, L. M. et al. (2024). Removal of

nitrogen, phosphates, and chemical oxygen demand from community wastewater by using treatment wetlands planted with ornamental plants in different mineral filter media. *Nitrogen*. 5(4):903-914.

- Marín-Muñiz, J. L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., López-Roldán, A., Vidal-Álvarez, M. y Martínez-Aguilar, K. E. et al. (2024). Phytoremediation performance with ornamental plants in monocultures and polycultures conditions using constructed wetlands technology. *Plants*. 13(7):1051.
- Martínez, F. Z., Bravo, D. R., Álvarez, A. C. y Lomelí, M. G. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*. 40(6):409-415.
- Mateo-Díaz, N. F., Sandoval Herazo, L. C., Zurita, F., Sandoval-Herazo, M., Nani, G. y Fernández-Echeverría, E. et al. (2023). Remediation of river water contaminated with whey using horizontal subsurface flow constructed wetlands with ornamental plants in a tropical environment. *Water*. 15(19):3456.
- Moazzem, S., Bhuiyan, M., Muthukumaran, S., Fagan, J. y Jegatheesan, V. (2024). A critical review of nature-based systems (NbS) for stormwater treatment in response to climate change and urbanization. *Current Pollution Reports*. 10(2):286-311.
- Moeder, M., Carranza-Díaz, O., López-Angulo, G., Vega-Aviña, R., Chávez-Durán, F. A. y Jomaa, S. et al. (2017). Potential of vegetated ditches to manage organic pollutants derived from agricultural runoff and domestic sewage: a case study in Sinaloa (Mexico). *Science of the Total Environment*. 598:1106-1115.
- Monteagudo-Hernández, G., Hernández-Castelán, D. A., Zamora-Lobato, T., Sandoval-Herazo, M., Hernández-Orduña, M. G. y Herazo, L. C. S. (2024). Evaluation of the pollutant removal efficiency of swine wastewater through two configurations of hybrid wetlands with tropical ornamental plants. *Results in Engineering*. 24:102864.
- Montoya, A., Tejeda, A., Sulbarán-Rangel, B. y Zurita, F. (2023). Treatment of tequila vinasse mixed with domestic wastewater in two types of constructed wetlands. *Water Science & Technology*. 87(12): 3072-3082.
- Nakase, C., Zurita, F., Nani, G., Reyes, G., Fernández-Lambert, G. y Cabrera-Hernández, A. et al. (2019). Nitrogen removal from domestic wastewater and the development of tropical ornamental plants in partially saturated mesocosm-scale constructed wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16(23): 4800.
- Nani, G., Sandoval-Herazo, M., Martínez-Reséndiz, G., Marín-Peña, O., Zurita, F. y Sandoval-Herazo, L. C. (2024). Influence of bed depth on the development of tropical ornamental plants in subsurface flow treatment wetlands for municipal wastewater treatment: A pilot-scale case. *Plants*. 13(14):1958.

- Nelson, D. R., Bledsoe, B. P., Ferreira, S. y Nibbelink, N. P. (2020). Challenges to realizing the potential of nature-based solutions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 45:49-55.
- Pacheco Aguilar, J. R., Maldonado Vega, M. y Peña Cabriales, J. J. (2012). Metabolismo del azufre de aislados bacterianos provenientes de un humedal artificial empleado para el tratamiento de efluentes de la industria curtidora. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 28(3):195-201.
- Payan-Villalva, M. G., Ramirez-Pereda, B., Mendivil-Garcia, K., Ortiz-Marin, A. D., Roé-Sosa, A. y Amabilis-Sosa, L. E. (2025). Performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland for the efficient reduction of pollution due to shrimp farm wastewater. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 60(6):283-292.
- Peralta Vega, A. J., Vergara Flórez, V., Marín-Peña, O., García-Aburto, S. G. y Sandoval Herazo, L. C. (2024). Treatment of domestic wastewater in Colombia using constructed wetlands with Canna hybrids and oil palm fruit endocarp. *Water*. 16(16):2290.
- Pérez-López, M. E., González-Elizondo, M. S., López-González, C., Martínez-Prado, A. y Cuevas-Rodríguez, G. (2009). Aquatic macrophytes tolerance to domestic wastewater and their efficiency in artificial wetlands under greenhouse conditions. *Hidrobiológica*. 19(3):233-244.
- Rahman, M. E., Bin Halmi, M. I. E., Bin Abd Samad, M. Y., Uddin, M. K., Mahmud, K. y Abd Shukor, M. Y. et al. (2020). Design, operation and optimization of constructed wetland for removal of pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(22):8339.
- Ramírez, E., Robles, E., Bonilla, P., Sainz, G., López, M. y De la Cerda, J. M. et al. (2005). Occurrence of pathogenic free-living amoebae and bacterial indicators in a constructed wetland treating domestic wastewater from a single household. *Engineering in Life Sciences*. 5(3):253-258.
- Rivas, A., Barceló-Quintal, I. y 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.
- Ríos-Montes, K. A., Casas-Zapata, J. C., Briones-Gallardo, R. y Peñuela, G. (2017). Optimal conditions for chlorothalonil and dissolved organic carbon in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health Part B*. 52(4):274-281.
- Rodríguez, F. S. S., Chaparro-Herrera, D. J., Vázquez-Arenas, J., Arias, A. N. y Alva-Martínez, A. F. (2024). Construction of wetlands in La Piedad Lagoon: a strategy to mitigate climate change in Mexico. *Blue-Green Systems*. 6(1):54-69.
- Roé-Sosa, A., Rangel-Peraza, J. G., Rodríguez-Mata, A. E., Pat-Espadas, A., Bustos-Terrones, Y. y Díaz-Peña, I. et al. (2019). Emulating natural wetlands oxygen conditions for the

removal of N and P in agricultural wastewaters. *Journal of Environmental Management*. 236:351-357.

- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E. y Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25(3):157-167.
- Ruiz, D., Gamboa, S. A., Paniagua-Solar, L. A., Téllez, N. y Zayas, T. (2025). Design of an efficient constructed wetland prototype for sustainable wastewater treatment in developing countries: A community case study in Mexico. *Journal of Water Process Engineering*. 69:106822.
- Saeed, T. y Sun, G. (2017). A comprehensive review on nutrients and organics removal from different wastewaters employing subsurface flow constructed wetlands. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 47(4):203-288.
- Salgado, I., Cárcamo, H., Carballo, M. E., Cruz, M. y Del Carmen Durán, M. (2017). Domestic wastewater treatment by constructed wetlands enhanced with bioremediating rhizobacteria. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(21):20391-20398.
- Salinas-Juárez, M. G., Ortiz-Zamora, S. I., Roquero-Tejeda, P., Garfias-Vásquez, F. J. y Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. D. C. (2024). Evaluation of electrode separators and the external resistance in electrochemically assisted constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*. 26(9):1420-1428.
- Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F. y Alvarado-Lassman, A. (2019). Evaluation of wastewater treatment by microcosms of vertical subsurface wetlands in partially saturated conditions planted with ornamental plants and filled with mineral and plastic substrates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16(2):167.
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M. y Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Applied Sciences*. 9(4):685.
- Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Adame-García, J., Fernández-Lambert, G. y Zurita, F. (2020). Effect of *Spathiphyllum blandum* on the removal of ibuprofen and conventional pollutants from polluted river water, in fully saturated constructed wetlands at mesocosm level. *Journal of Water and Health*. 18(2):224-228.
- Sandoval, L., Zurita, F., Del Ángel-Coronel, O. A., Adame-García, J. y Marín-Muñiz, J. L. (2020). Influence of a new ornamental species (*Spathiphyllum blandum*) on the removal of COD, nitrogen, phosphorus and fecal coliforms: a mesocosm wetland study with PET and tezontle substrates. *Water Science & Technology*. 81(5):961-970.
- Sandoval Herazo, L. C., Marín-Muñiz, J. L., Alvarado-Lassman, A., Zurita, F., Marín-Peña, O. y Sandoval-Herazo, M. (2023). Full-scale constructed wetlands planted with

- ornamental species and PET as a substitute for filter media for municipal wastewater treatment: An experience in a Mexican rural community. *Water*. 15(12):2280.
- Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M. y Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*. 10(5):1594.
- Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., López-Méndez, M. C., Martínez-Sibaja, A., Aguilar-Lasserre, A. A. y Zamora-Castro, S. et al. (2020). Effects of ornamental plant density and mineral/plastic media on the removal of domestic wastewater pollutants by home wetlands technology. *Molecules*. 25(22):5273.
- Sandoval-Herazo, M., Martínez-Reséndiz, G., Echeverría, E. F., Fernández-Lambert, G. y Herazo, L. C. S. (2021). Plant biomass production in constructed wetlands treating swine wastewater in tropical climates. *Fermentation*. 7(4):296.
- Tapia González, F., Giacomán Vallejos, G., Herrera Silveira, J., Quintal Franco, C., García, J. y Puigagut, J. (2009). Treatment of swine wastewater with subsurface-flow constructed wetlands in Yucatán, Mexico: influence of plant species and contact time. *Water SA*. 35(3):335-342.
- Tejeda, A., Valencia-Botín, A. J. y Zurita, F. (2022). Resistance evaluation of *Canna indica*, *Cyperus papyrus*, *Iris sibirica* and *Typha latifolia* to phytotoxic characteristics of diluted tequila vinasses in wetland microcosms. *International Journal of Phytoremediation*. 25(10):1259-1268.
- Tella, T. A., Festus, B., Olaoluwa, T. D. y Oladapo, A. S. (2025). Water and wastewater treatment in developed and developing countries: Present experience and future plans. p. 351-385. In: *Smart nanomaterials for environmental applications*. Elsevier.
- Tirado Aguilar, F. I., Peña Montes, C., Borroto Pentón, Y., López Méndez, M. C., Castellanos Rivera, J. y Martínez Castellanos, G. et al. (2025). Microplastic identification in domestic wastewater-treating constructed wetlands and its potential usage in a circular economy. *Processes*. 13(5):1499.
- Vasquez, L. A. H., García, F. P., Lassman, A. A., Gómez, C. R., Torres, E. A. y Salinas, G. H. et al. (2023). Treatment of laundry wastewater by constructed wetlands with *Eichhornia crassipes*. *Desalination and Water Treatment*. 312:50-54.
- Vergara-Flórez, V., Míeles-Galindo, J., Nani, G., Sandoval-Herazo, M. y Herazo, L. C. S. (2023). Treatment wetland with *Thalia geniculata* for wastewater depuration in the department of Sucre, Colombia. *Processes*. 11(9):2754.
- Vidales-Contreras, J. A., Gerba, C. P., Karpiscak, M. M., Acuna-Askar, K. y Chaidez-Quiroz, C. (2006). Transport of coliphage PRD1 in a surface flow constructed wetland. *Water Environment Research*. 78(11):2253-2260.

- Vidales-Contreras, J. A., Gerba, C. P., Karpiscak, M. M., Valdez-Cepeda, R. D. y Hernández-Escareño, J. J. (2012). Transport and removal of coliphage PRD1 in constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 47(1):142-148.
- Vidales-Contreras, J. A., Rodríguez-Fuentes, H. y Luna-Maldonado, A. I. et al. (2015). Displacement of Br⁻ and P22 in a wetland environment. *Water, Air, and Soil Pollution*. 226:192.
- Viveros, J. A. F., Martínez-Reséndiz, G., Zurita, F., Marín-Muñiz, J. L., Méndez, M. C. L. y Zamora, S. et al. (2022). Partially saturated vertical constructed wetlands and free-flow vertical constructed wetlands for pilot-scale municipal/swine wastewater treatment using *Heliconia latispatha*. *Water*. 14(23):3860.
- Vymazal, J. (2018). Do laboratory scale experiments improve constructed wetland treatment technology? *Environmental Science and Technology*. 52:12956-12957.
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*. 11(2):174.
- Zamora, S., Marín-Muñiz, J. L., Nakase-Rodríguez, C., Fernández-Lambert, G. y Sandoval, L. (2019). Wastewater treatment by constructed wetland eco-technology: Influence of mineral and plastic materials as filter media and tropical ornamental plants. *Water*. 11(11):2344.
- Zamora, S., Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Fernández-Lambert, G. y Hernández-Orduña, M. G. (2019). Impact of ornamental vegetation type and different substrate layers on pollutant removal in constructed wetland mesocosms treating rural community wastewater. *Processes*. 7(8):531.
- Zamora-Castro, S. A., Marín-Muñiz, J. L., Sandoval, L., Vidal-Álvarez, M. y Carrión-Delgado, J. M. (2019). Effect of ornamental plants, seasonality, and filter media material in fill-and-drain constructed wetlands treating rural community wastewater. *Sustainability*. 11(8):2350.
- Zamora-Castro, S. A., González-Moreno, H. R., Hernández-Orduña, M. G., Zitácuaro-Contreras, I. y Marín-Muñiz, J. L. (2025). Environmental assessment of a constructed wetland with ornamental vegetation for wastewater treatment: A sustainable option for neighborhoods (the case of Veracruz, Mexico). *World*. 6(2):50.
- Zapata-Morales, A. L., Hernández-Morales, A., La Torre, M. C. A., Leyva-Ramos, S., Vázquez-Martínez, J. y Soria-Guerra, R. E. (2024). Cultivable bacteria contribute to the removal of diclofenac and naproxen mix in a constructed wetland with *Typha latifolia*. *Environmental Geochemistry and Health*. 46(12):524.
- Zhang, H., Tang, W., Wang, W., Yin, W., Liu, H. y Ma, X. et al. (2021). A review on China's constructed wetlands in recent three decades: Application and practice. *Journal of Environmental Sciences*. 104:53-68.

- Zurita, F., Belmont, M., De Anda, J. y Cervantes-Martínez, J. (2008). Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in subsurface-flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*. 33(2):110-118.
- Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J. y White, J. R. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science & Technology*. 63(4):654-659.
- Zurita, F., De Anda, J. y Belmont, M. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Quality Research Journal*. 41(4):410-417.
- Zurita, F., De Anda, J. y Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 35(5):861-869.
- Zurita, F. y Carreón-Álvarez, A. (2014). Performance of three pilot-scale hybrid constructed wetlands for total coliforms and *Escherichia coli* removal from primary effluent – a 2-year study in a subtropical climate. *Journal of Water and Health*. 13(2):446-458.
- Zurita, F. y 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(2):213-228.
- Zurita, F., Roy, E. D. y White, J. R. (2011). Municipal wastewater treatment in Mexico: current status and opportunities for employing ecological treatment systems. *Environmental Technology*. 33(10):1151-1158.

Panorama global de la investigación sobre humedales construidos con plantas ornamentales

Global overview of research on constructed wetlands vegetated with ornamental
plants

Jazmín Alejandra Segovia Cano, José Luis Marín-Muñiz, Irma Zitácuaro-
Contreras, Luis Carlos Sandoval Herazo, Graciela Elizabeth Nani González,
Mayerlin Sandoval Herazo

Resumen

Los humedales construidos son soluciones basadas en la naturaleza que constituyen una tecnología verde eficiente, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Durante las últimas tres décadas, el uso de plantas ornamentales como vegetación predominante en estos sistemas ha surgido como una alternativa innovadora que integra la depuración de aguas con beneficios estéticos, productivos y sociales. Además de mejorar la calidad paisajística, estas especies permiten la generación de biomasa con valor comercial y favorecen una mayor aceptación pública de la tecnología. En este contexto, el presente estudio desarrolla un análisis bibliométrico y de tendencia científicas con el objetivo de caracterizar la evolución de la investigación mundial sobre humedales construidos con plantas ornamentales (HCP) durante el periodo 1996-2026. Se identifican los países, autores, instituciones y especies vegetales más estudiadas, así como las redes de colaboración científica y las principales líneas emergentes de investigación en este campo.

Palabras clave: Humedales construidos; plantas ornamentales; tratamiento de aguas residuales; bibliometría; soluciones basadas en la naturaleza; fitorremediación.

Abstract

Constructed wetlands are well established nature-based solutions delivering low cost, ecologically sustainable green technology for wastewater remediation. Over the past three decades, the integration of ornamental plant species as primary vegetation within these engineered systems has emerged as an innovative technical pathway that couple's wastewater treatment with aesthetic enhancement, biomass production and socially inclusive benefits. Beyond landscape improvement, ornamental vegetation can yield commercially valuable biomass and improve public acceptance of constructed wetland infrastructure. Drawing on bibliometric methods

and scientific trend analysis, this characterizes global research evolution for ornamental plant vegetated constructed wetlands (CWPs) over the period 1996–2026. The analysis identifies leading contributing countries, authors, research institutions and commonly deployed plant taxa, maps international scientific collaboration networks, and delineates principal emerging research frontiers within this subject domain.

Keywords: Constructed wetlands; ornamental plants; wastewater treatment; bibliometrics; nature-based solutions; phytoremediation.

Introducción

La creciente presión antropogénica sobre los recursos hídricos y la intensificación de la contaminación de aguas residuales han impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles y socialmente aceptables. Entre estas, los humedales construidos (HC) se han consolidado como una alternativa ecológica robusta para la depuración de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas (Zurita & Sandoval, 2024), gracias a su bajo costo operativo, su capacidad de integración paisajística y su alta eficiencia en la remoción de contaminantes mediante procesos fisicoquímicos y biológicos (Muñoz-Aguilar & Marín-Muñiz, 2024), sin recurrir a sistemas de tratamiento convencionales de alto costo de instalación u operativo.

Tradicionalmente, los HC han empleado vegetación típica de humedales naturales (*Typha*, *Juncus*, *Phragmites* sp.) debido a su alta adaptabilidad y eficacia en procesos de fitorremediación (Vymazal, 2013; Sandoval et al., 2019). Sin embargo, en las últimas dos décadas ha emergido con fuerza un interés creciente por el uso de plantas ornamentales (*Zantedeschia aethiopica*, *Heliconia* sp., *Anturium*, *Zingiber spectabile*, *Alpinia purpurata*, *Canna* sp., *Spathiphyllum* sp.) en estos sistemas, potenciando no solo la función depuradora, sino también los beneficios estéticos, socioeconómicos y de aceptación comunitaria con especies de valor comercial (Sandoval et al., 2019; Zitacuaro-Contreras et al., 2021).

La inclusión de vegetación ornamental en los HC es una vertiente innovadora de investigación dentro con esta ecotecnología, lo cual responde a una doble finalidad, por una parte se exploran las capacidades de estas plantas para absorber y transformar nutrientes y contaminantes presentes en aguas residuales; por otra, se busca que la belleza visual de la vegetación fomente la aceptación, adopción y gestión comunitaria de los sistemas de tratamiento, especialmente en contextos urbanos y rurales donde las tecnologías convencionales resultan costosas o culturalmente menos atractivas (Morales et al., 2013; Calheiros et al., 2017; Zurita et al., 2023;).

La literatura científica indica que las plantas en humedales captan nitrógeno, fósforo y otros compuestos directamente a través de sus raíces y tejidos, contribuyendo a la eliminación de estos contaminantes del agua, como lo demuestra diferentes investigaciones (Núñez et al., 2011; Headley et al., 2019). Asimismo, el uso de ellas abre nuevas posibilidades para integrar la gestión de aguas residuales con criterios de diseño paisajístico y producción de biomasa con valor comercial, lo que la hace una tecnología viable desde el punto de vista técnico y una estrategia integradora de sustentabilidad ambiental, desarrollo económico local y bienestar comunitario (Zurita & White, 2014; Marín-Muñiz et al., 2020)

No obstante, pese a los avances, la investigación global aún enfrenta desafíos significativos, que requieren de análisis en cuanto a dónde se están realizando, quienes lo realizan y las brechas de investigación al respecto (Morales et al., 2013; Marín-Muñiz et al., 2023). Por otra parte, las condiciones hidráulicas ejercen una influencia integral y vital en los humedales construidos (Zhao et al., 2024), así como también lo son el sustrato y la vegetación, puesto que tienen como característica la fijación y absorción de contaminantes (Rivas, 2014).

Estudios recientes sobre humedales construidos indican que la mayoría de los estudios experimentales sobre el diseño, rendimiento y mecanismos de tratamiento se han realizado a escalas laboratorio o piloto, mientras que los estudios a escala real y los ensayos de campo a gran escala son poco frecuentes, lo que limita la transferencia de resultados de investigación a aplicaciones prácticas y la comprensión de la dinámica de estos sistemas en condiciones reales de operación (Vymazal et al., 2021), lo cual también demuestra un área de interés de investigación.

Asimismo, se requiere un entendimiento más profundo de los mecanismos fisiológicos y ambientales que subyacen a la capacidad depuradora de las especies ornamentales, así como estudios comparativos entre diferentes climas y regiones geográficas. Estos aspectos son fundamentales para consolidar la integración de los HC ornamentales como una alternativa robusta, sostenible y aceptada por la sociedad para enfrentar los retos de la gestión de aguas residuales.

Aunque la literatura científica ha mostrado el uso de HC, aún es fragmentada, lo cual sugiere que esta área aún se encuentra en una fase emergente de desarrollo científico en comparación con otros temas de tratamiento de aguas residuales y tecnologías ecológicas, por lo que el uso de herramientas bibliométricas facilita una comprensión más profunda de las conexiones entre autores, conceptos y áreas temáticas. Esta capacidad de diagnóstico es especialmente valiosa para áreas de investigación emergentes o con aplicaciones prácticas relevantes como los

humedales contruidos con plantas ornamentales, ya que sitúa el estado del arte dentro de un contexto global y facilita la identificación de oportunidades para avanzar en la ciencia y la innovación tecnológica (Chen et al., 2012; Al-Sulaiman & Al-Khuzaie, 2023).

En este contexto, el presente estudio ofrece una visión panorámica actualizada sobre la investigación global en humedales contruidos con plantas ornamentales, abordando tendencias, principales especies estudiadas, mecanismos de acción, resultados de remoción de contaminantes, y brechas de conocimiento. Con ello se busca contribuir a un mejor entendimiento de esta prometedora área de la ciencia ambiental y abrir espacios para investigaciones futuras que integren innovación, eficiencia ecológica y cohesión social en el tratamiento de aguas residuales.

Metodología

Para la realización de este análisis se emplearon métodos bibliométricos con bases de datos internacionales y herramientas como VOSviewer y Dimensions para el análisis de redes y visualización de tendencias. Se recopilaron publicaciones usando las palabras clave “constructed wetlands” y “ornamental plants” para identificar artículos con título y resumen que contengan estas palabras, con ello se encontraron 140 publicaciones en las últimas tres décadas, por lo que se realizó un mapeo.

Dentro de la búsqueda de información y de acuerdo con los datos encontrados se presentan los autores que han publicado sobre humedales contruidos con plantas ornamentales, mismos que corresponden a 474, de los cuales se tomaron en cuenta solo aquellos que tuvieran al menos 3 publicaciones, para realizar esta representación se desarrolla un mapeo que se presenta en la figura 1.

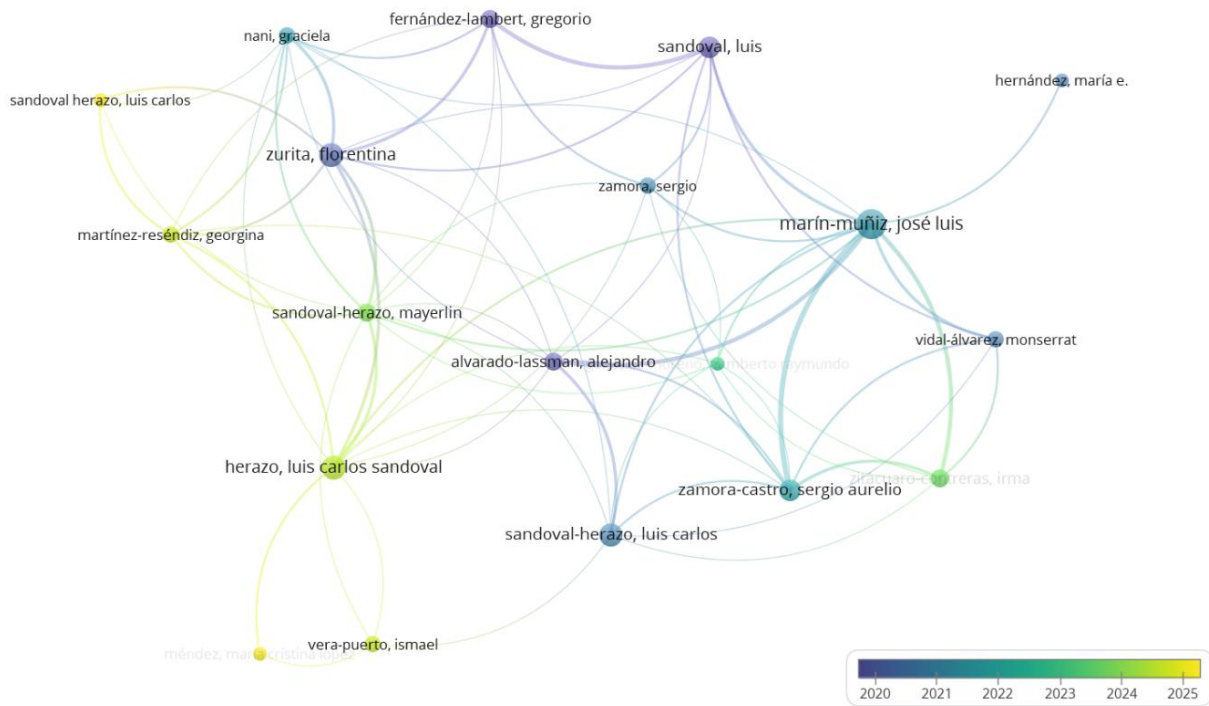


Figura 1.- Red bibliométrica de coautoría a partir de los términos de búsqueda “constructed wetlands AND ornamental plants”. Fuente: VOSviewer a través de datos dimensions

En este mapa se puede visualizar la red de coautoría, donde cada nodo representa un autor y cada enlace indica la existencia de al menos una publicación conjunta, la escala cromática (2020-2025) sugiere una dimensión temporal, lo que permite observar la evolución de las colaboraciones a lo largo del tiempo. La escala de color indica una evolución progresiva de las colaboraciones, los nodos más recientes en tonalidad amarilla sugieren incorporaciones recientes a la red, posiblemente asociadas a nuevas colaboraciones internacionales, proyectos emergentes o nuevos estudiantes de posgrado, en contraste, los nodos en tonalidades más oscuras reflejan colaboraciones más consolidados, lo cual sugiere una red con cierta estabilidad estructural.

El mapa de redes representa una red moderadamente densa con un núcleo central bien definido, dominado por el nodo Marín-Muñoz José Luis, quien representa el mayor número de conexiones directas con otros investigadores. De acuerdo con Newman (2001), este señala que las redes de coautoría en ciencia suelen presentar estructuras de tipo “Scale-free”, donde algunos nodos concentran gran parte de las conexiones, mientras que la mayoría de los autores poseen pocas colaboraciones.

El principal nodo intermediario “Marín-Muñiz José Luis” tiene el mayor número de publicaciones sobre el tema, teniendo 14 publicaciones y 461 citas, en este caso dicho autor conecta con múltiples clústeres de colaboración, lo que indica un papel relevante en la integración de agendas de investigación, seguido de los autores; “Sandoval, Luis” con 7 documentos y 327 citas, “Zamora Castro, Sergio Aurelio” con 7 documentos y 279 publicaciones y “Zurita, Florentina” con 8 documentos y 182 citas, es importante mencionar que aunque el rango de estudio va desde 1996 al 2026, a partir del 2020 al 2024 las publicaciones fueron igual o mayores a 5.

Por otra parte se analizó que autores han realizado mayores colaboraciones y se encontró que Marín Muñiz, José Luis y Herazo, Luis Carlos Sandoval, ambos tienen publicaciones con 12 colaboradores, autores como Herazo, Luis Carlos Sandoval parecen actuar como puentes entre subredes, conectando grupos que de otro modo estarían parcialmente aislados, este tipo de posiciones estructurales es particularmente relevante para la difusión del conocimiento, ya que los actores ubicados en “structural holes” facilitan el intercambio entre comunidades científicas para promover proyectos interdisciplinarios, facilitar redes internacionales y aumentar la visibilidad del grupo de investigación (figura 2 y 3).

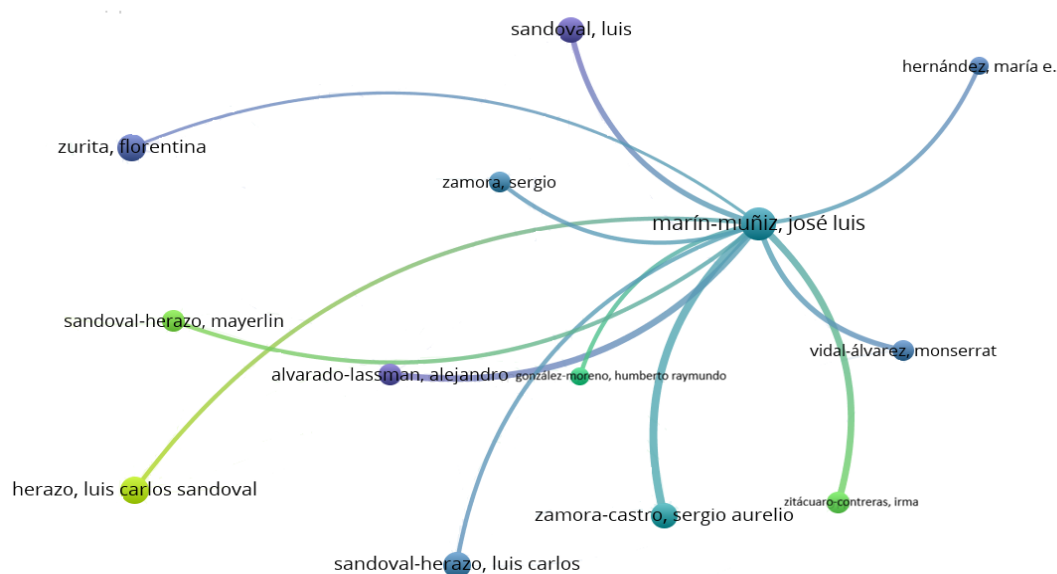


Figura 2.- Red bibliométrica de colaboradores. Fuente: VOSviewer a través de datos dimensions.

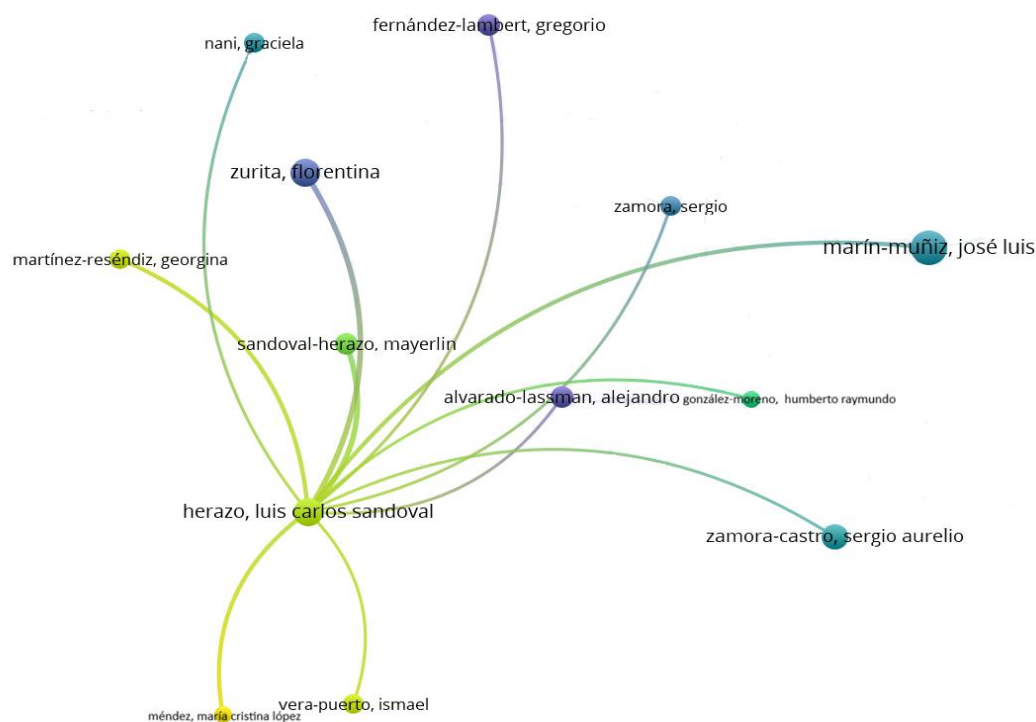


Figura 3.- Red bibliométrica de colaboradores. Fuente: VOSviewer a través de datos de dimensions.

Lo anterior coincide con estudios que demuestran que los investigadores con mayor centralidad tienden a presentar mayor impacto científico y mayor productividad (Abbasi, Altmann & Hossain, 2011).

Estos subgrupos reflejan líneas de investigación específicas o colaboraciones institucionales recurrentes. En análisis de redes, este fenómeno corresponde a modularidad, donde la red se divide en comunidades densamente conectadas internamente, pero con menos enlaces hacia el exterior (Fortunato, 2010).

En el análisis bibliométrico se encuentran hallazgos de 34 país que han desarrollado investigación sobre la temática planteada, sin embargo, solo se tomaron en cuenta aquellos que contaran con al menos 5 publicaciones, teniendo como resultado 8 países más sobresalientes (figura 4).

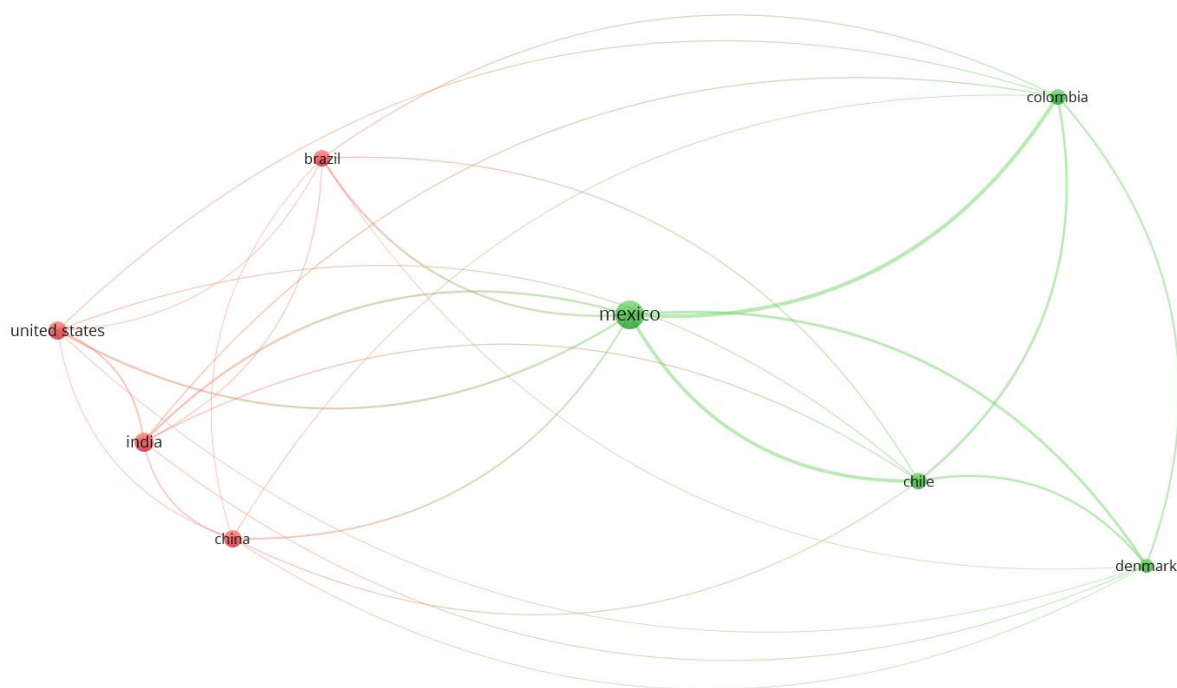


Figura 4.- Red bibliométrica de países. Fuente: VOSviewer a través de datos dimensions.

La red refleja un campo científico activo de colaboración internacional en la que se revela una estructura centrada en México como nodo principal, puesto que se tienen 42 publicaciones y 1261 citas, desde el cual se articulan múltiples interacciones científicas con países de América, Europa y Asia. Este tipo de configuración es característico de redes de colaboración científica donde un país funciona como “hub” de producción científica, facilitando el flujo de conocimiento entre diferentes sistemas de investigación.

La mayor centralidad de grado indica que en México se concentra el mayor número de vínculos colaborativos con otros países, lo que sugiere que el sistema mexicano actúa como eje articulador dentro de esta red específica de producción académica. Estudios sobre redes globales de ciencia han demostrado que los países con mayor centralidad en redes de colaboración internacional tienden a exhibir mayores niveles de productividad científica e impacto académico (Wagner & Leydesdorff, 2005) Así mismo, la cooperación internacional se ha convertido en un factor determinante para el incremento de la visibilidad científica y la calidad de la investigación.

Dentro del mapa se localizan colaboraciones con India, quien tiene 685 citaciones y 12 publicaciones, país que ha incrementado significativamente su producción científica durante las últimas dos décadas. La participación de India en redes internacionales de investigación se ha consolidado gracias a su creciente inversión en ciencia y tecnología, así como a la expansión de su sistema universitario.

Según análisis globales de producción científica, India se ha posicionado entre los países productores de artículos científicos a nivel mundial, particularmente en áreas de ingeniería, ciencias ambientales y tecnología (King, 2004).

Países como estados Unidos y Dinamarca son colaboradores particularmente relevantes desde la perspectiva de la internacionalización de la ciencia, ya que permite la integración de investigadores de países emergentes en redes globales de conocimiento, la presencia de Dinamarca con 375 citas y 5 publicaciones es especialmente significativa, dado que los países nórdicos presentan altos niveles de inversión en investigación y desarrollo y una fuerte colaboración científica internacional.

Finalmente la red de colaboración internacional analizada muestra un sistema científico articulado alrededor de México, esta estructura refleja un proceso de internacionalización progresiva de la producción científica, en el cual los investigadores participan simultáneamente en redes regionales y globales, en consecuencia, la consolidación de redes internacionales de colaboración constituye un elemento clave para fortalecer la competitividad científica de los sistemas nacionales de investigación.

La producción científica es un factor importante en el análisis bibliométrico, por lo que a continuación se presenta un mapa de relaciones entre fuentes o áreas temáticas de publicaciones científicas, entre las cuales destacan; ecological engineering, wáter, porcesses, environmental science and pollution research, wáter science & technology, hortscience (Figura 5).

El análisis de la red bibliométrica muestra una estructura de interacción entre revistas especializadas en ciencias del agua, ingeniería ecológica y contaminación ambiental, lo cual refleja la naturaleza interdisciplinaria de la investigación en tratamiento de aguas y fitorremediación.

El nodo con mayor centralidad corresponde a Ecological Engineering, el cual aparece como un punto de conexión entre las revistas orientadas a procesos ambientales y aquellas enfocadas específicamente en calidad del agua, cuenta con 19 publicaciones y 1392 citas, esto es consistente con la evolución del campo de la ingeniería ecológica aplicada a sistemas naturales de tratamiento, particularmente humedales construidos.

Diversos estudios han demostrado que la ingeniería ecológica se ha considerado como un enfoque clave para el tratamiento sostenible de aguas residuales, integrando principios de ecología, microbiología y procesos fisicoquímicos (Mitsch

& Jorgensen, 2024). La fuerte relación observada entre Water Science & Technology y Environmental Science & Pollution Research puede interpretarse como una convergencia entre investigaciones de carácter tecnológico y estudios centrados en impacto ambiental y contaminación. Esto refleja una tendencia creciente en la literatura científica donde los procesos de tratamiento de agua se evalúan no solo desde la eficiencia técnica, sino también desde su impacto ecológico y sostenibilidad (Vymazal, 2014).

El nodo Water aparece conectado al clúster de procesos, lo que sugiere su papel como revista multidisciplinaria que integra estudios sobre hidrología, tratamiento de agua, modelación de procesos y gestión de recursos hídricos. Esta revista ha publicado 9 trabajos y obtenido 234 citas sobre humedales construidos haciendo uso de plantas ornamentales.

Por otra parte, la revista Processes presenta una fuerte fuerza de enlace entre las revistas orientadas que refleja el interés creciente en la optimización de procesos biogeoquímicos involucrados en la depuración natural del agua. Y demostrando su apertura a estudios relacionados con el medio ambiente, específicamente sobre tratamiento de agua, soluciones basadas en la naturaleza, tecnologías eficientes y sobre el aprovechamiento sustentable de los recursos.

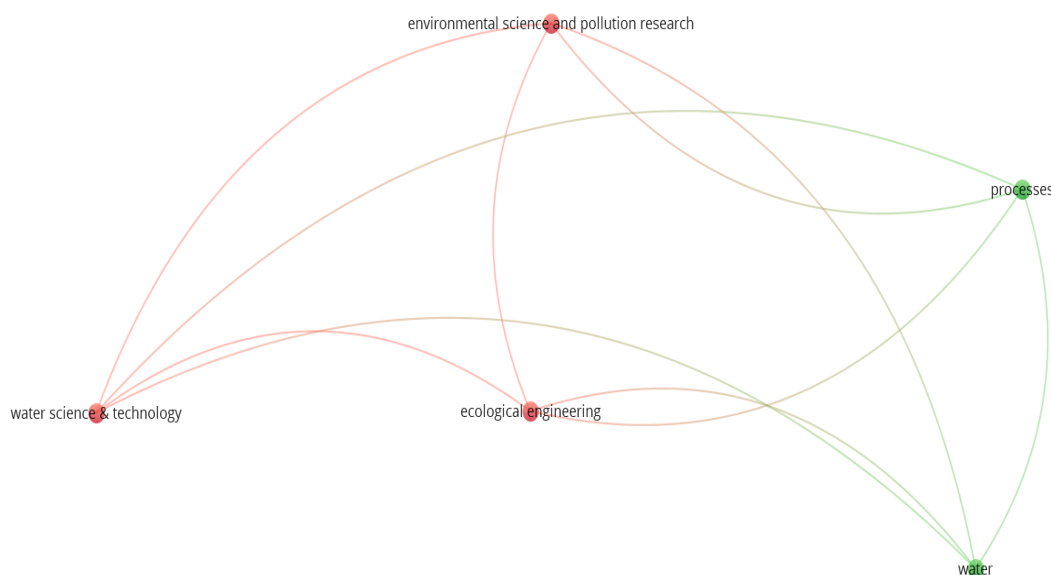


Figura 5.- Red bibliométrica entre revistas científicas. Fuente: VOSviewer a través de datos dimensions.

El mapa bibliométrico de co-citación de fuentes revela la estructura intelectual que sustenta el campo de estudio, permitiendo identificar las revistas y ejes conceptuales que articulan la producción científica. La red muestra una configuración claramente organizada en dos clústeres principales, lo que sugiere la coexistencia de subdominio temáticos complementarios dentro del área de investigación.

Finalmente la interacción entre estos ejes refleja la transición de enfoques tradicionales, lo que sugiere que el desarrollo del campo ha evolucionado desde una aproximación centrada en la eficiencia técnica hacia un enfoque más holístico orientado a soluciones basadas en la naturaleza y sostenibilidad de sistemas hídricos, la presencia de revistas especializadas en sostenibilidad dentro de la red sugiere un desplazamiento progresivo de las agendas de investigación hacia impactos ambientales integrales y evaluación de servicio ecosistémicos.

Es importante tomar en cuenta la colaboración entre instituciones, puesto que se asocia a investigaciones sobre humedales construidos, tratamiento de aguas residuales y tecnología ecológicas, donde cada nodo representa una institución académica o centro de investigación, mientras que las conexiones indican relaciones de coautoría y cooperación científica. La disposición espacial y la intensidad de las aristas permiten identificar patrones de interacción, centralidad y agrupamiento entre las instituciones participantes (Figura 6).

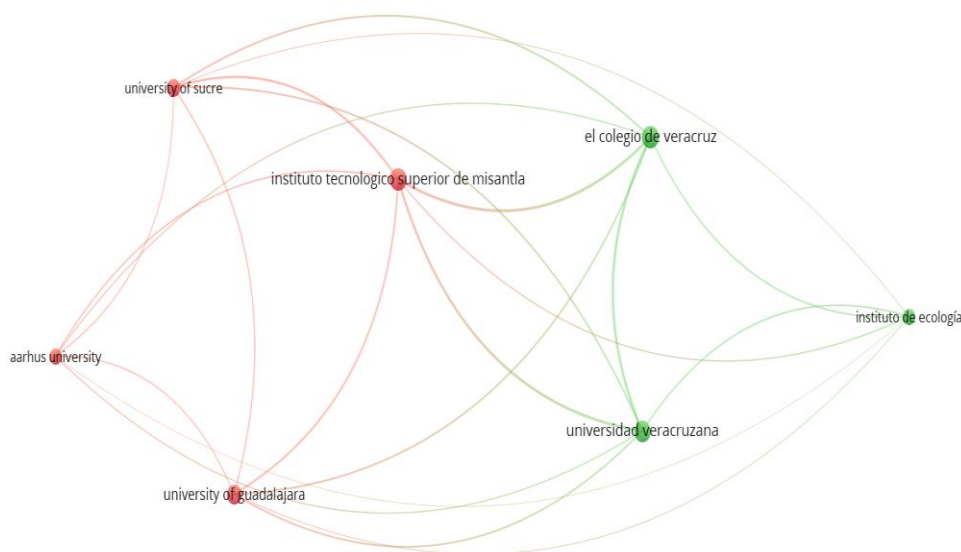


Figura 6.- Red bibliométrica de instituciones académicas o centros de investigación.
Fuente: VOSviewer a través de datos dimensions.

La red exhibe una estructura relativamente compactada con dos comunidades principales claramente diferenciadas, representadas cromáticamente en rojo y verde. El clúster verde se encuentra conformado principalmente por instituciones mexicanas como la Universidad Veracruzana, El Colegio de Veracruz y el Instituto de Ecología, las cuales presentan altos niveles de interconexión. Dentro de este grupo, la Universidad Veracruzana ocupa una posición estratégica debido a su elevado número de enlaces directos, sugiriendo un papel central en la articulación científica de la red. Esta posición indica una alta centralidad de grado y posiblemente una elevada centralidad de intermediación, atributos que suelen asociarse con instituciones capaces de coordinar proyectos, facilitar intercambio de conocimiento y promover colaboraciones interdisciplinarias.

Por otra parte, el clúster rojo agrupa instituciones como el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, la University of Guadalajara, Aarhus University y la University of Sucre. En el subconjunto destaca particularmente el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, el cual mantiene conexiones importantes tanto con instituciones nacionales como internacionales, funcionando como nodo puente entre ambos conglomerados. Desde la perspectiva del análisis de redes, este comportamiento es característico de actores que ocupan posiciones de intermediación estructural, favoreciendo la circulación de información entre comunidades científicas parcialmente separadas.

La presencia de instituciones internacionales como Aarhus University y University of Sucre evidencian un proceso de internacionalización de la investigación y confirma la existencia de cooperación científica transnacional en el área de ingeniería ecológica y humedales construidos. En particular, la interacción entre instituciones mexicanas y europeas puede interpretarse como resultado de colaboraciones orientadas al intercambio metodológico, fortalecimiento de capacidades técnicas y desarrollo conjunto de soluciones ambientales sustentables.

Asimismo, la figura refleja un patrón de modularidad, entendido como la formación de comunidades densamente conectadas internamente, pero con menor número de enlaces externos. Este fenómeno ha sido ampliamente descrito en redes científicas y suele asociarse con líneas de investigación especializadas, afinidades temáticas o colaboraciones institucionales recurrentes. La existencia de conexiones entre ambos clústeres indica que, aunque las comunidades mantienen cierta independencia estructural, existen actores clave que facilitan la integración de la red.

Desde una perspectiva bibliométrica, la configuración observada es consistente con modelos de redes de colaboración científica, donde pocas instituciones concentran la mayor parte de las conexiones, mientras que otras participan de manera periférica.

En términos científicos, la red sugiere un ecosistema colaborativo en consolidación, caracterizado por una fuerte participación de instituciones mexicanas y una creciente articulación internacional. Este tipo de estructuras favorece la generación de conocimiento interdisciplinario, incrementa la visibilidad académica y fortalece el desarrollo de tecnologías sustentables aplicadas al tratamiento ecológico de aguas residuales mediante humedales construidos y vegetación ornamental.

A la par de lo anterior, este análisis demuestra un campo de investigación que podría requerir más aliados, mayores relaciones de investigación son necesarias y evidenciadas. Estas faltas de colaboración pueden afectar en tener datos más específicos y certeros de la funcionalidad de las plantas ornamentales en el tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos. Cuando se trabaja aisladamente, se podrían estar repitiendo objetivos de investigación entre los estudios. De allí la importancia de redes colaborativas que alineen propuestas de proyectos que puedan analizarse desde diferentes ópticas o desde la ciencia multidisciplinaria. A la par, estos estudios también demuestran el avance en mitigar los problemas de contaminación hídrica y que buscan minimizar los impactos negativos al reducir al límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021). Este estudio también podría funcionar como una herramienta de visualización rápida de los investigadores en el tópico, para posibles acercamientos de trabajo conjunto o para búsqueda de estudios pertinentes en el campo del uso de los humedales construidos o de tratamiento con plantas ornamentales.

Conclusiones

Este estudio bibliométrico demuestra que la investigación sobre humedales construidos con plantas ornamentales es un campo en expansión con aportes crecientes a la ingeniería y al tratamiento sustentable de aguas residuales. México destaca como un nodo central de producción científica en uso de humedales construidos con plantas ornamentales, acompañado por redes colaborativas internacionales, lo cual ha incrementado paulatinamente, pero a la par muestra una brecha de investigación colaborativa por atender. Las tendencias actuales apuntan hacia un enfoque interdisciplinario que incorpora aspectos ecológicos, sociales y económicos, además de las tradicionales métricas de eficiencia en la eliminación de

contaminantes. Se destaca que los mapas bibliométricos demuestran la necesidad de mayores relaciones de trabajo entre países y el mayor intercambio de conocimiento, para evitar replicabilidad de las mismas investigaciones y fomentar la innovación en este campo de los humedales de tratamiento que utilizan plantas ornamentales.

Bibliografía

- Abbasi, A., Altmann, J., & Hossain, L. (2011). Identifying the effects of co-authorship networks on the performance of scholars: A correlation and regression analysis of performance measures and social network analysis measures. *Journal of Informetrics*, 5(4), 594–607. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.001>
- Al-Sulaiman, A. M., & Al-Khuzaie, N. H. (2023). A scientometric analysis and bibliometric review of the efficiency of various constructed wetlands to remove pollutants in wastewater. *Journal of Chemical Health Risks*, 13(6), 1407–1422.
- Calheiros, C. S. C., Bessa, V. S., Mesquita, R. B. R., Brix, H., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L. (2017). Constructed wetlands with ornamental plants for wastewater treatment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 9385–9403. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8333-z>
- Chen, C., Hu, Z., Liu, S., & Tseng, H. (2012). Emerging trends in regenerative medicine: A scientometric analysis in CiteSpace. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 12(5), 593–608. <https://doi.org/10.1517/14712598.2012.674507>
- Fortunato, S. (2010). Community detection in graphs. *Physics Reports*, 486(3–5), 75–174. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2009.11.002>
- Headley, T. R., Tanner, C. C., & Nivala, J. (2019). Role of plants in subsurface flow treatment wetlands: A review of pollutant removal mechanisms. *Water Research*, 157, 160–176. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115008>
- King, D. A. (2004). The scientific impact of nations. *Nature*, 430(6997), 311–316. <https://doi.org/10.1038/430311a>
- Marín-Muñiz, J. L., Hernández, M. E., Moreno-Casasola, P., & White, J. R. (2020). Green infrastructure with ornamental plants for wastewater treatment and resource recovery in developing countries. *Water*, 12(8), 2170. <https://doi.org/10.3390/w12082170>
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora, S. (2023). Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: A review of experiences during the last twenty-two years. *Processes*, 11(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>

- Marín-Muñiz, J. L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., Álvarez-Hernández, L. M., Martínez-Aguilar, K. E., López-Roldán, A., & Zamora, S. (2023). Bibliometric analysis of constructed wetlands with ornamental flowering plants: The importance of green technology. *Processes*, 11(4), 1253. <https://doi.org/10.3390/pr11041253>
- Mitsch, W. J., & Jørgensen, S. E. (2004). *Ecological engineering and ecosystem restoration*. John Wiley & Sons.
- Morales, G., Paredes, D., & Londoño, D. (2013). Uso de plantas ornamentales en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingeniería y Competitividad*, 15(2), 81–91.
- Muñoz-Aguilar, C. L., & Marín-Muñiz, J. L. (2024). Innovaciones en el diseño de humedales construidos para mejorar el tratamiento de las aguas residuales. *Ciencias de la Ingeniería-FIUACAM*, 1(2). <https://doi.org/10.26359/UACAMCI.0102>
- Newman, M. E. J. (2001). The structure of scientific collaboration networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 404–409. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.404>
- Núñez, D. R., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. J. (2011). Phytofiltration of artificial wastewater containing nitrate and phosphate using ornamental plants in a hydroponic system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(3), 705–717. <https://doi.org/10.3390/ijerph8030705>
- NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Rivas, A., Beltrán, F., Acedo, B., & Gimeno, O. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment and reuse: Role of vegetation and substrate in pollutant removal. *Ecological Engineering*, 37(11), 1796–1802. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.039>
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 61(Part A), 582–592. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.023>

- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*, 73, 724–751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.023>
- Vymazal, J., Kröpfelová, L., & others. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>
- Wagner, C. S., & Leydesdorff, L. (2005). Network structure, self-organization, and the growth of international collaboration in science. *International Journal of Information Management*, 25(2), 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2005.03.001>
- Zhao, Y., Wu, S., García, J., & Vymazal, J. (2024). Hydraulic conditions and performance optimization in constructed wetlands: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 370, 122348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122348>
- Zitácuaro-Contreras, K., Marín-Muñiz, J. L., Hernández-Melchor, D. J., Sandoval, L., & Castro-Castellón, A. T. (2021). Ornamental plants in constructed wetlands: Resource recovery and pollutant removal from domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 169, 106401. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106401>
- Zurita, F., & White, J. R. (2014). Comparative study of three two-stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high-quality effluent in warm climates. *Ecological Engineering*, 64, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.036>
- Zurita, F., Belmont, M. A., White, J. R., & Sandoval, L. (2023). Ornamental plants in constructed wetlands: Current status and future research directions. *Ecological Engineering*, 191, 106984. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106984>
- Zurita-Martínez, F., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 6–10. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.186>

Eje temático 3:

Funcionalidad de los humedales de tratamiento: casos de intervención

Efecto del tipo de sustrato sobre la remoción de contaminantes y crecimiento de plantas ornamentales en humedales a escala piloto en clima subtropical

Effects of substrate composition on pollutant removal performance and ornamental plant growth in pilot scale constructed wetlands under subtropical climatic conditions

María Elizabeth Hernández Alarcón, Gerardo Lagunes Herrera

Resumen

Se estudió la remoción de contaminantes (amonio- NH_4 , fosfatos- PO_4 , sulfatos- SO_4 y Demanda Bioquímica de Oxígeno-DQO), en humedales de flujo subsuperficial a nivel piloto con dos tipos de sustrato (Grava (G), Zeolita (Z) y Zeolita-Grava (ZG)). Las celdas Z y ZG removieron significativamente más NH_4 que las celdas G. En cuanto a la remoción de PO_4 , SO_4 y DQO, no se observaron diferencias significativas entre los dos sustratos. El crecimiento de las plantas ornamentales si fue afectado por el tipo de sustrato y la especie de planta. Los alcatraces- *Zantedeschia aethiopica* registraron un aumento de su altura y floración en las celdas G, mientras que en las celdas (Z y ZG), el crecimiento fue mínimo o nulo. El jengibre blanco- *Hedychium coronarium* presentó un comportamiento similar a los alcatraces. Sin embargo, las aves del paraíso- *Strelitzia reginae* aumentaron su tamaño y floración de forma similar en las celdas G, Z y ZG.

Palabras Clave: Flores; Grava; Zeolita; Amonio; Sulfatos.

Abstract

This experiment investigated the removal of ammonium (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}), sulphate (SO_4^{2-}) and chemical oxygen demand (COD) within pilot scale subsurface flow constructed wetlands employing three substrate treatments: gravel (G), zeolite (Z), and mixed zeolite gravel (ZG). Zeolite containing treatments (Z and ZG) achieved statistically significantly higher ammonium nitrogen removal relative to gravel only units. No statistically significant inter treatment differences were

detected for phosphate, sulphate or COD removal. Substrate type exerted measurable influences on ornamental plant vegetative development and flowering performance, with responses taxon specific. *Zantedeschia aethiopica* exhibited enhanced height gain and flowering under gravel only conditions, whereas growth was severely suppressed within zeolite amended beds (Z, ZG). *Hedychium coronarium* displayed broadly comparable response patterns. By contrast, *Strelitzia reginae* maintained consistent vegetative growth and flowering performance across all three substrate variants (G, Z, ZG).

Keywords: Flowers; Gravel; Zeolite; Ammonium; Sulphates.

Introducción

Los humedales de tratamiento son sistemas inspirados en las funciones de los humedales naturales, creados por el hombre con el propósito de mejorar la calidad de aguas residuales. Estos sistemas consisten en canales con sustrato por donde el agua fluye y a través de procesos fisicoquímicos y biológicos, los contaminantes son removidos (Hernández, 2013). Los humedales de tratamiento también son llamados humedales construidos o humedales artificiales y son una opción ecológicamente adecuada para el tratamiento de aguas residuales, especialmente para pequeñas comunidades (Hernández, 2016). En comparación con los sistemas de tratamiento convencionales, los humedales artificiales tienen varias ventajas, como menores costos de construcción y mantenimiento y se han utilizado ampliamente en los países desarrollados para el tratamiento de diversos tipos de fuentes puntuales de contaminación (Vymazal, 2007).

La utilización de plantas ornamentales en humedales construidos en países como México podría facilitar la adopción de la tecnología por parte de la comunidad (Hernández, 2016; Marín et al, 2017; 2020; Hernández et al, 2018; Sandoval Herazo et al, 2019). El sustrato en los humedales construidos es un componente muy importante, ya que en él se llevan a cabo procesos bióticos y abióticos de remoción de contaminantes (Ji et al., 2022). El sustrato más utilizado en los humedales de flujo subsuperficial es la grava. Sin embargo, este tipo de sustrato no presenta buenas eficiencias de remoción de amonio ni fosfatos. De allí que en los últimos años se ha buscado otro tipo de sustratos con mejores eficiencias de remoción de estos compuestos. La zeolita se conoce como un sustrato con alta capacidad de adsorción de aniones y cationes, por lo que su utilización en humedales construidos podría

mejorar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fosforo. Sin embargo, poco se conoce sobre el crecimiento de las plantas ornamentales en este sustrato.

El objetivo del trabajo fue evaluar la remoción de contaminantes y el crecimiento de plantas nativas y ornamentales en humedales a nivel piloto, utilizando dos sustratos (Grava y Zeolita) bajo condiciones climáticas subtropicales.

Metodología

Sitio de estudio

Las celdas de los humedales construidos a escala piloto se encuentran ubicadas en el Campus III del Instituto de Ecología A.C. ubicado en la carretera antigua a Coatepec entre los municipios de Xalapa y Coatepec. Las coordenadas del sitio son 19.511397, -96.944687 (Google Maps, 2017) (Figura 1). El sistema trata las aguas residuales sin sólidos de 5 departamentos de visitantes en dichas instalaciones y el drenaje de una casa vecina a las instalaciones del INECOL. La temperatura media normal de Xalapa es de 19.2°C, mientras que la media mínima es de 18°C, y tiene una precipitación anual media de 1435 mm.

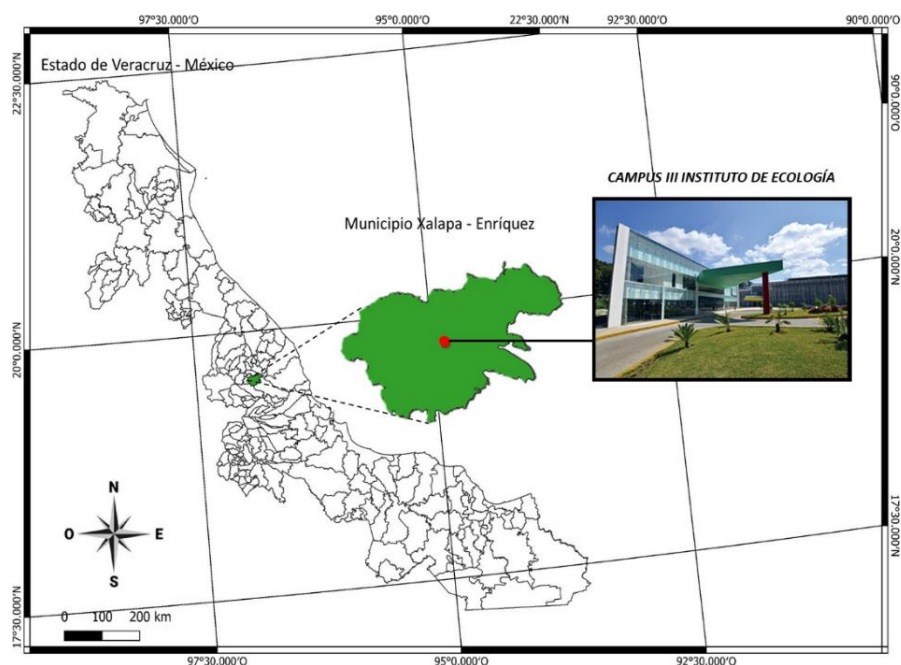


Figura 11. Ubicación del sitio de estudio en la región del municipio de Xalapa, Veracruz, México. Autoría propia.

Descripción del sistema

El humedal consta de 4 celdas, cada una de 12 m de largo, 1 m de ancho y 0.6 m de altura, además posee una pendiente del 2%. Las celdas fueron construidas de acuerdo con la configuración de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.

El arreglo del sustrato en las celdas durante la fase 1 (6 meses de operación) fue que dos celdas tenían como medio de soporte únicamente grava; y dos celdas tenían los primeros 2 m (en relación con la entrada del sistema) y los últimos 0.8 m grava como medio de sustrato, mientras que de los 2.0 a los 11.2 m contenían zeolita. El tamaño de partícula de ambos soportes fue de aprox. 2 cm de diámetro con una porosidad del 40%. Al término de la fase 1, en las celdas que contenían zeolita, una capa superficial de 30 cm de zeolita fue remplazada por grava a lo largo del área de las celdas que tenían dicho sustrato e inicio la operación de la fase II (seis meses). En ambas fases los humedales operaron con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 4 días.

Las cuatro celdas tuvieron el mismo arreglo de la vegetación que consistió en un policultivo de plantas de humedal (sombrillas y papiros) y plantas ornamentales. En todas las celdas, los primeros 2 metros relativos a la entrada del influente fueron sembrados con Sombrillas- *Cyperus alternifolius* y de allí se distribuyeron las siguientes especies en policultivo, indicándose el número de individuos por celda: *Zantedeschia aethiopica* (34) *Lilium sp.* (9), *Cyperus papyrus* (4), *Heliconia sp.* (9), *Strelitzia reginae* (9) y *Hedychium coronarium* (20).

Monitoreo de la calidad del agua

Cada semana durante 12 meses, se tomaron muestras de 250 ml, a la entrada y a la salida de cada celda de humedal. Las muestras se colocaron en recipientes de plástico y se mantuvieron en hielo hasta su transporte al laboratorio y se mantuvieron en refrigeración hasta su análisis. Las muestras se centrifugaron a 3000 rpm por 15 minutos en una centrifuga de HERMLE Z-306 y se les determinó por espectrometría la concentración de nitrógeno amoniacal por el método de Nessler (APHA, 1998) y aniones $(PO_4)^{2-}$ y $(SO_4)^{2-}$ por cromatografía iónica utilizando un Cromatógrafo Dionex ICS- 1100 (Hernández y Marín-Muñiz, 2018) y a las muestras sin filtrar se les determinó por espectrofotometría visible la demanda química de oxígeno DQO por el micro método 0-1500 mg/L (Orozco, 1992).

Resultados y discusión

Remoción de contaminantes

La concentración de nitrógeno amoniacal, vario entre 10 y 65 mg/L durante el periodo de estudio y la remoción promedio en las celdas con grava fue de 68 y 70% durante la fase 1 y 2, respectivamente (Figura 1). Mientras que las remociones en las celdas con zeolita fueron significativamente ($p \leq 0.05$) más altas (97 y 98%, respectivamente).

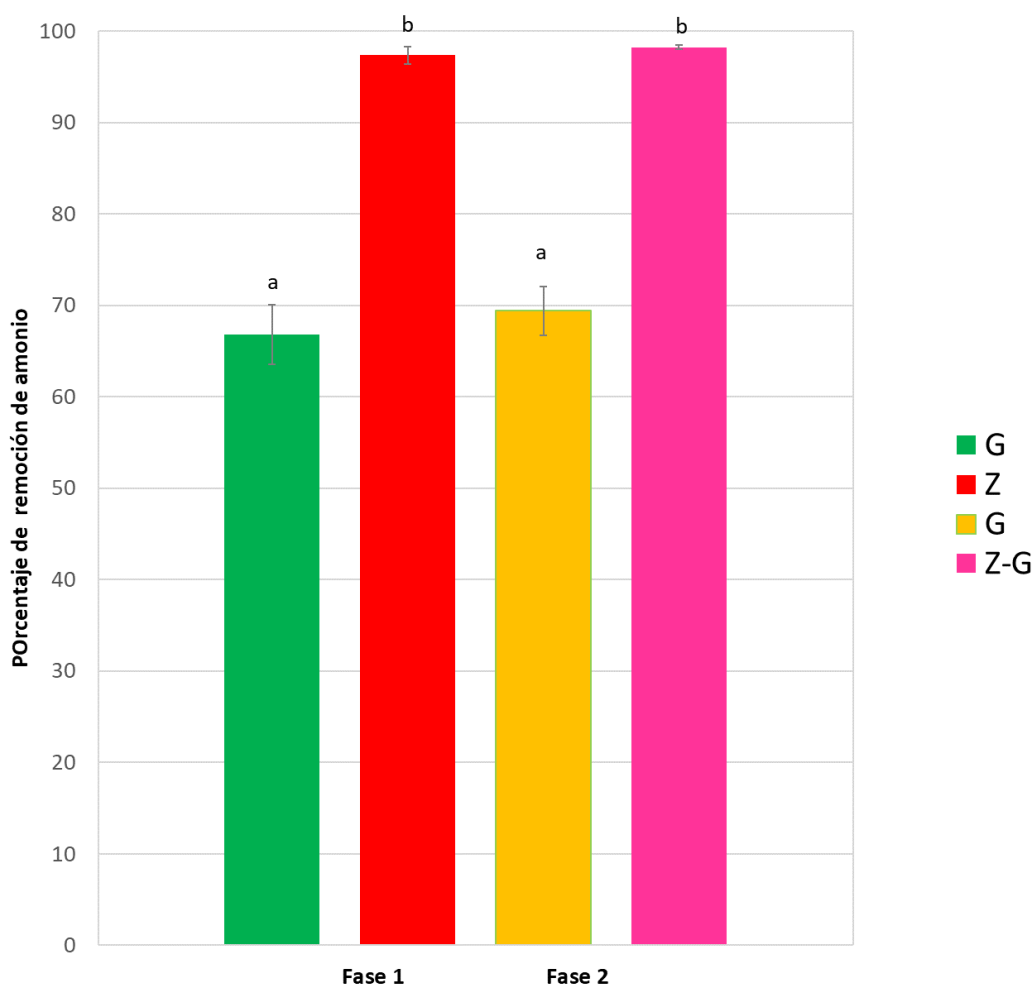


Figura 2.- Remoción de nitrógeno amoniacal en los humedales construidos con diferente tipo de sustrato.

La concentración de fosfatos varió entre 2 y 6 mg/L durante el periodo de estudio, aunque no se encontraron diferencias significativas en las eficiencias de remoción con los diferentes sustratos. Se observó una tendencia a mayores eficiencias de

remoción en la grava (62 y 58% durante la fase 1 y 2) comparados con la zeolita (44 y 47%) (Figura 3).

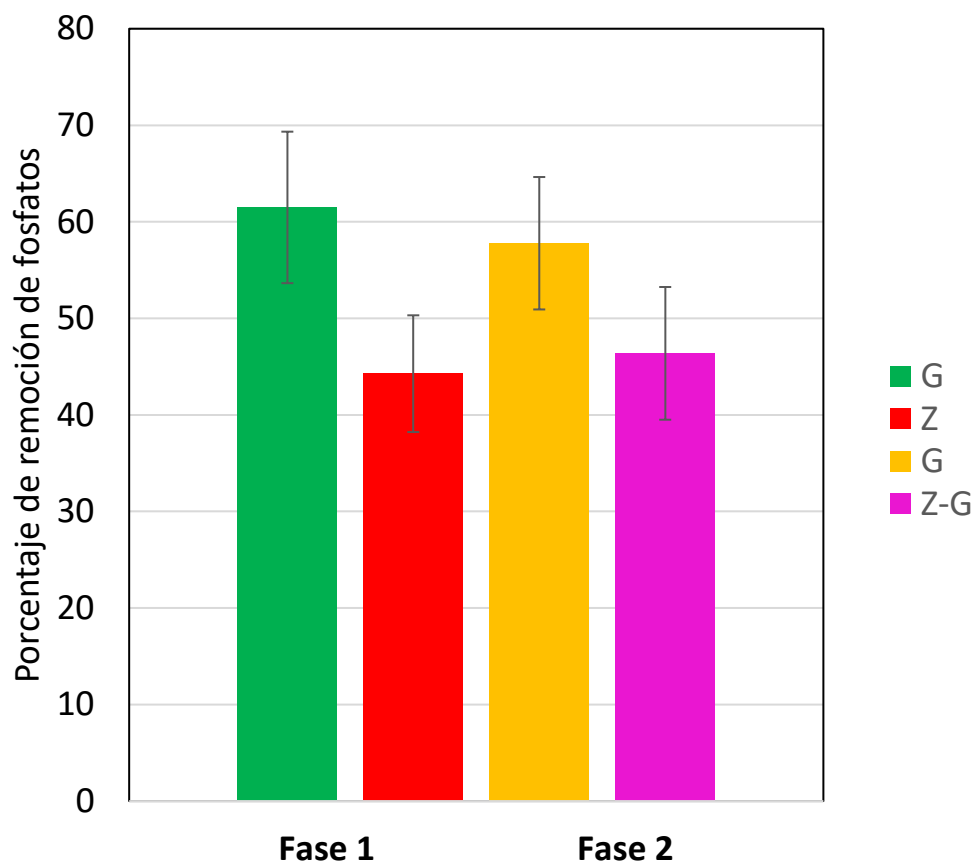


Figura 3.- Remoción de fosfatos en los humedales construidos con diferente tipo de sustrato.

La concentración de sulfatos varió entre 15 a 90 mg/L durante el estudio y no se observaron diferencias en la remoción de este anión, siendo de 82% para grava y zeolita en la fase 1 y de 78% en la segunda fase para ambas grava y zeolita (Figura 3).

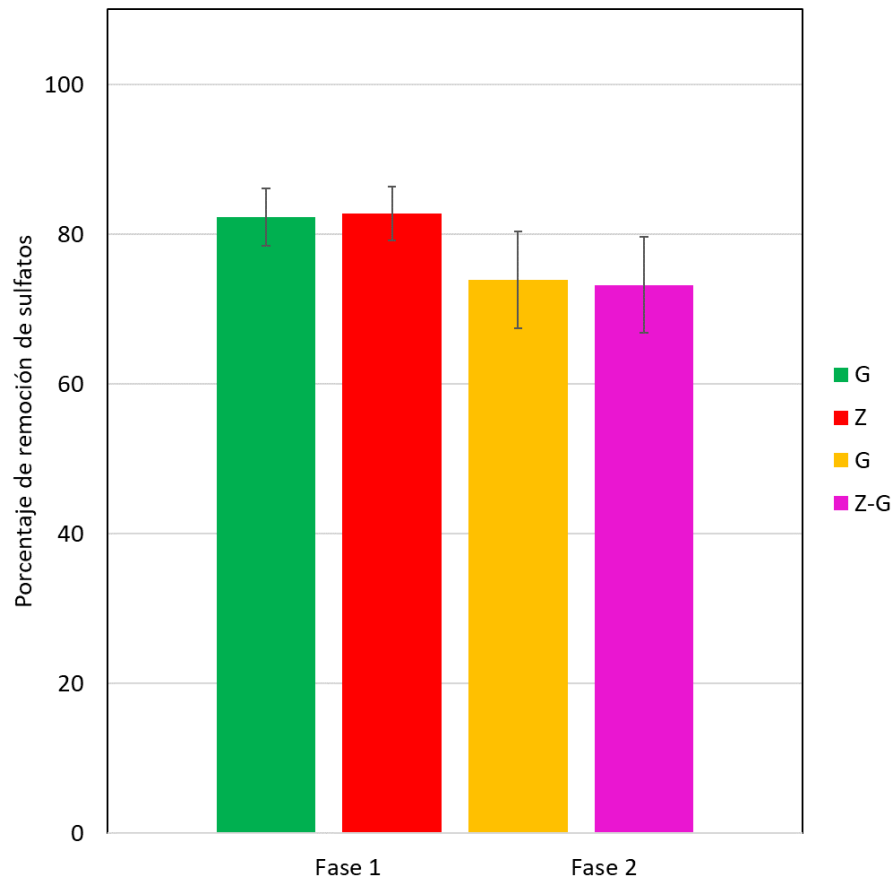


Figura 4.- Remoción de sulfatos en los humedales construidos con diferente tipo de sustrato.

La concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a la entrada de los humedales varió entre 100 y 1000 mg/L y no se observaron diferencias significativas ($p \geq 0.05$) en su remoción, siendo de 80 y 70% para grava y zeolita respectivamente en la fase 1 y de 68 para grava y 72% para zeolita en la fase 2 (Figura 5).

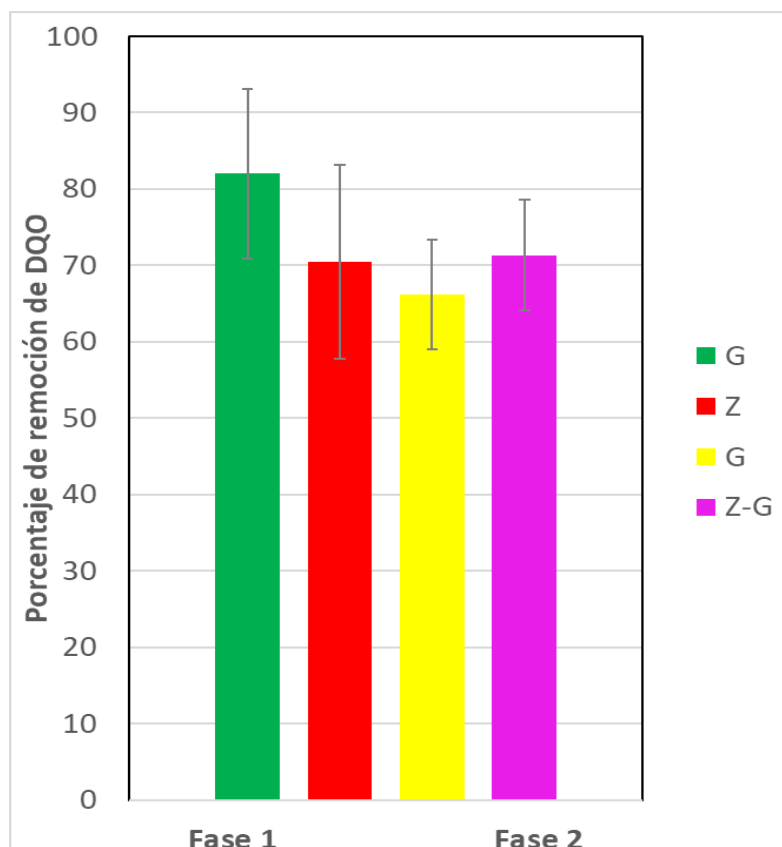


Figura 5.- Remoción de sulfatos en los humedales construidos con diferente tipo de sustrato.

Los resultados sobre las altas eficiencias de remoción de amonio por parte de la zeolita, en los humedales piloto, coinciden con diversos estudios en humedales a nivel laboratorio (Shuib et al. 2011; Wang et al. 2013; Araya et al. 2015). Por el contrario, los resultados de la remoción de fosfatos no están en congruencia con lo esperado, ya que se esperaban más altas remociones con zeolita. Sin embargo, nuestros resultados coinciden con Shuib et al. (2011); quienes encontraron un aumento de hasta 40% del fósforo total en la salida del humedal; demostrando que la zeolita puede no ser un buen material de soporte para remover los fosfatos del humedal.

Ellos discuten que el fósforo tiende a generarse por la descomposición de la materia orgánica depositada en el fondo del humedal, lo cual podría disminuir la remoción de este. Esto podría ser el caso en este estudio, ya que en el tratamiento con zeolita se registraron muchas pérdidas de plantas por marchitamiento, las cuales pudieron disolverse en el humedal. Aunado a esto, la zeolita fue un competidor de nitrógeno amoniacal para la vegetación emergente, el crecimiento inapropiado de la flora pudo

inhibir uno de los mecanismos importantes de eliminación de fósforo dentro del humedal, como fue la absorción vegetal.

Crecimiento de plantas

Se presentan los resultados de tres especies, que indicaron distintas repuestas al sustrato, dependiendo del tipo de planta ornamental. En el caso de los alcatraces-*Zantedeschia aethiopica*, en el sustrato grava se observó un crecimiento de 15 a 30 cm durante la primera etapa y de 25 a 30 cm durante la segunda. En cambio, en la zeolita, durante la primera fase no hubo aumento de la altura y en la segunda etapa las plantas se murieron y sacaron retoños, pero su crecimiento fue nulo y tenían un color muy amarillento (Figura 6).

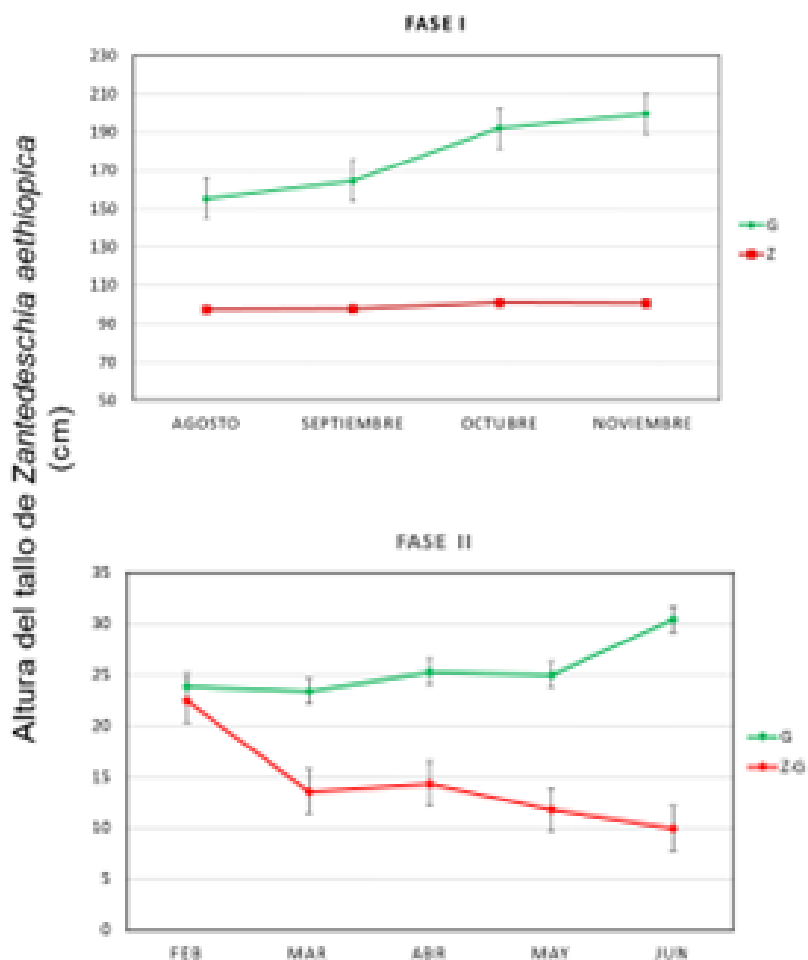


Figura 6. Crecimiento de *Zantedeschia aethiopica* en humedales contruidos con diferente tipo de soporte en Xalapa, Veracruz, México.

Un comportamiento similar se observó para el jengibre blanco-*Hedychium coronarium*, en la grava en la fase 1, aumentaron su tamaño de 40 a 70 cm en y de 25 a 30 cm durante la fase 2. Mientras que en la zeolita durante la fase 1, las plantas se murieron, en la segunda etapa con la mezcla de zeolita y grava, ya no se murieron, pero el crecimiento fue mínimo y también se observaron amarillas (Figura 7).

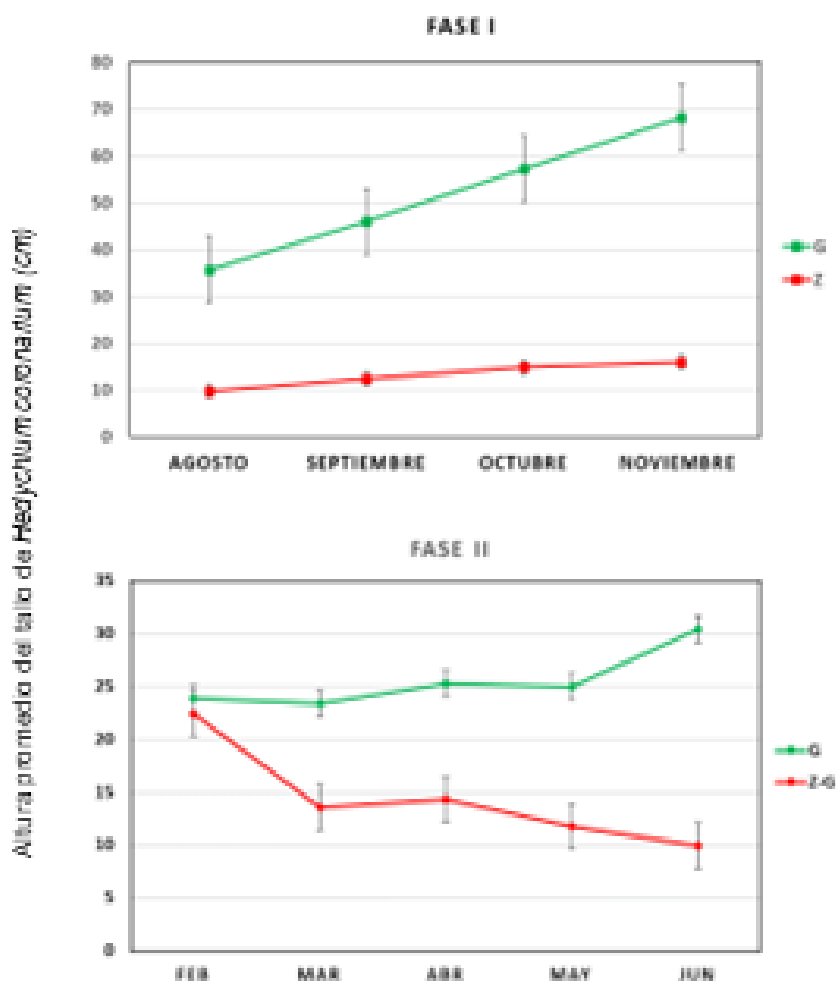


Figura 7. Crecimiento de *Hedychium coronarium* en humedales construidos con diferente tipo de soporte en Xalapa, Veracruz, México.

Por el contrario, las plantas de ave de paraíso-*Strelitzia reginae*, mostraron aumento en su altura en ambos sustratos, en la grava aumentó su altura de 25 a 32 cm y en la zeolita de 25 a 28 cm durante la fase 1 y en la fase dos, en la grava aumentó de 22 a 27 cm y en la zeolita grava de 24 a 27 cm, observándose las plantas verdes en ambos sustratos (Figura 8).

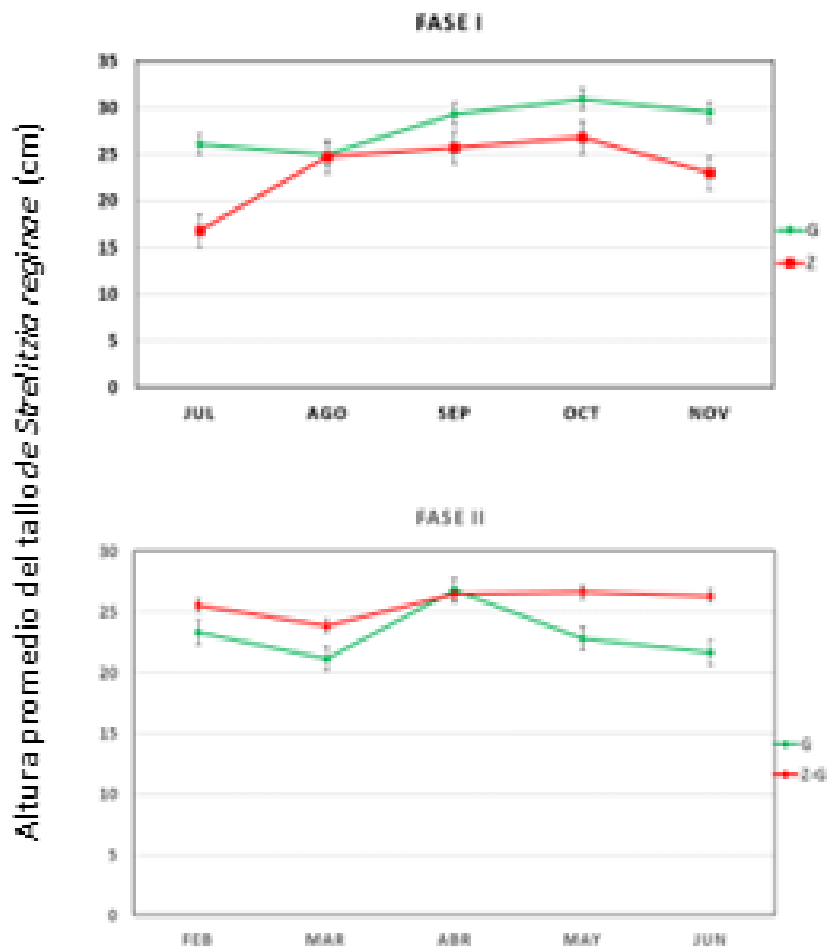


Figura 8. Crecimiento de *Strelitzia reginae* en humedales construidos con diferente tipo de soporte en Xalapa, Veracruz, México.

El crecimiento de plantas ornamentales ha sido descrito en grava (Zurita et al., 2009, Calheiros et al., 2015). Asimismo, el crecimiento de plantas ornamentales ha sido descrito como exitoso en otros sustratos como plástico de reciclaje (Sandoval-Herazo 2019). Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio son relevantes, ya que existe poca información sobre el crecimiento de plantas ornamentales en zeolita. En este tipo de sustrato, plantas ornamentales como los alcatraces y el jengibre blanco no tuvieron buenos crecimientos, lo cual indica que este tipo de plantas tienen una demanda de nitrógeno alta y la zeolita al adsorber el amonio del agua, hace una competencia por el nitrógeno, ocasionando que las plantas no se desarrollen y finalmente mueren por falta de nutrientes. Por el contrario, las plantas del ave del paraíso se desarrollan bien en ambos sustratos, grava y zeolita, aunque con mejor

desarrollo en grava, lo cual significa que quizás ellas tienen una menor demanda de nitrógeno, por lo que aún en zeolita con la competencia que el sustrato hace del amonio, la planta se puede desarrollar y no muere. Con estos resultados, se pueden planear estrategias sobre el tipo de plantas a utilizar si se quiere tener humedales con alta eficiencia de remoción de amonio, utilizando zeolita como sustrato.

Conclusiones

En humedales de flujo subsuperficial, la zeolita incrementa la eficiencia de remoción de NH_4 respecto a la grava, pero no tiene efecto en la remoción de PO_4 , SO_4 y DQO.

El crecimiento de alcatraces y jengibre blanco se vio disminuido cuando se utilizó zeolita sola o en combinación grava como sustrato. Solo las plantas de ave del paraíso crecieron de manera similar en grava y en zeolita, indicando que esta planta tiene poca demanda de nitrógeno, por lo que la adsorción de amonio por la zeolita no causó competencia con la planta.

Se recomienda utilizar zeolita de manera localizada en los humedales en lugar de toda la celda, lo anterior para permitir el desarrollo de más especies de plantas ornamentales y disminuir costos, ya que el costo de la zeolita es mayor al de la grava.

Referencias

- Abedi, T., Mojiri, A. (2019). Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*. 16: 100472. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472>
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (1998). 20th Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC.
- Araya, G., Vera, I., Sáez, K., Vidal, G. (2015). Effects of aeration and natural zeolite on ammonium removal during the treatment of sewage by mesocosm-scale constructed wetlands. *Environmental Technology*. 37(14): 18111820. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1133715>
- Calheiros, C.S.C., Bessa, V.S., Mesquita, R.B.R., Brix, H., Rangel, A.O.S.S., Castro, P.M.L. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*. 79:17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.001>

- Google Maps. (s/f). Google Maps. Recuperado el 15 de agosto de 2017 de <https://www.google.com/maps/dir/19.511397,+96.944687+/@19.511763,-96.9634194,6991m/data=!3m1!1e3!4m6!4m5!1m3!2m2!1d-96.944687!2d19.511397!1m0?entry=ttu>
- Hernández M.E. (2013). Ecological engineering for controlling water pollution in Latin America. p. 465-482. In: WITPress. *Ecological Dimensions for Sustainable Socio Economic Development* (Ed: Alejandro Yáñez-Arancibia, Raymundo Dávalos-Sotelo, John W. Day & Enrique Reyes), México.
- Hernández, M.E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *RINDERESU*. 1 (2): 1-12. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16> [consultado el 15 de agosto de 2024].
- Hernandez, M.E., Galindo, Z.M., y Hernández, J.C. (2018). Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. *Ecological Engineering*. 114: 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.001>
- Hernández M.E., Marín-Muñiz J.L. (2018). Greenhouse Gas Emissions and Treatment Performance in Constructed Wetlands with Ornamental Plants. In: *Constructed or Artificial Wetlands: a suitable technology for sustainable water Mangement*. Bazua-Dominguez de Bazua, C., Navarro, E and Bayona, J. (Eds). CRC. 13-978-1-1387-3918-5
- Ji, Z., Tang, W., Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*. 286(1):131564. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131564>
- Marín, J.L., García, M.C., Ruelas L.C., Moreno P. (2017). Influence of Different Porous Media and Ornamental Vegetation on Wastewater Pollutant Removal in Vertical Subsurface Flow Wetland Microcosms. *Environmental Engineering Science*. 35(2): 88-94. <https://doi.org/10.1089/ees.2017.0061>
- Marín, J.L., Hernández, M.E., Gallegos, M.P., Amaya S.I. (2020). Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetlands microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecological Engineering*. 147:105658. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105658>
- Orozco, S., Cantero, V., Rodríguez, JF. (1992). *Manual de Referencia del Tratamiento Anaerobio de Aguas Mieles del Café*. Seminario-Taller “El Tratamiento Anaerobio de los residuos del Café: Una Alternativa Energética para la Disminución del Impacto ambiental en el Sector”. Comité de las

- Comunidades Europeas, Comité de acción de Apoyo al Desarrollo Económico y Social de Centroamérica. Matagalpa, Nicaragua.
- Sandoval Herazo, L.C., Zamora, S.A., Vidal, M., Marín, J.L. (2019). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*. 9(4):685. <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Sandoval Herazo, L.C.; Marín-Muñiz, J.L.; Alvarado-Lassman, A.; Zurita, F.; Marín-Peña, O.; Sandoval-Herazo, M. (2023). Full-Scale Constructed Wetlands Planted with Ornamental Species and PET as a Substitute for Filter Media for Municipal Wastewater Treatment: An Experience in a Mexican Rural Community. *Water*, 15, 2280. <https://doi.org/10.3390/w15122280>
- Shuib, N., Baskaran, K., Jegatheesan, V. (2011). Evaluating the performance of horizontal flow constructed wetlands using natural zeolite (escott). *International Journal of Environmental Science and Development*. 2(4): 311-315. <https://www.ijesd.org/show-32-387-1.html> [consultado el 15 de agosto 2024].
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*. 380(1–3):48-65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Wang, H., Xuejin, L. (2013). Removal of chemical nitrogen and phosphorous of micropolluted water with modified zeolite subsurface wetland. *Asian journal of chemistry*. 25(15): 8647-8649. <http://dx.doi.org/10.14233/ajchem.2013.14883>
- 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(5): 861-869. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>

Fitorremediación de aguas residuales con *Acrostichum danaeifolium* y *Typha dominguensis* vía humedales artificiales

Phytoremediation of Wastewater with *Acrostichum danaeifolium* and *Typha dominguensis* in Constructed Wetlands

Gaspar López Ocaña, Rudy Solís Silván, David Guerreo Zarate, Roberto Rodríguez Bastarmérito, Carlos Alberto Torres Balcázar

Resumen

Una de las alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales son los Humedales Construidos (HC), pues son una opción para pequeñas comunidades rurales, con poco o nulo consumo de energía y su mantenimiento no es muy especializado. El presente estudio evaluó la fitorremediación de aguas residuales con *A. danaeifolium* y *T. dominguensis*, en humedales construidos de flujo libre (HCFL) y subsuperficial (HCFS) a escala piloto. Los resultados muestran que los HCFS-A fueron los de mayor desempeño con TRH de 4.9 a 2.9 días (a seis y doce meses), con coeficiente cinético para de DBO (0.37 d^{-1}) y DQO (0.41 d^{-1}) al año y las remociones fueron en Turbiedad 97.4%, SST 97.2%, DBO 97.5%, DQO 94.95, NT 98.2% y PT 96.5%, mostrando un excelente trabajo en la combinación de las especies. El HCFS-A logró alcanzar el cumplimiento de los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Palabras Clave: DBO, DQO, eficiencia de remoción, coeficiente cinético.

Abstract

Phytoremediation performance of *Acrostichum danaeifolium* and *Typha dominguensis* in pilot scale constructed wetlands for domestic wastewater treatment Constructed wetlands (CWs) represent a sustainable wastewater treatment alternative particularly suited to small rural communities, owing to minimal energy input and low complexity maintenance requirements. This study evaluated phytoremediation efficiency for domestic wastewater using *Acrostichum danaeifolium* and *Typha dominguensis* in pilot scale free water surface (FWS CW) and subsurface flow (SSF CW) units. Subsurface flow wetlands vegetated with *A. danaeifolium* (SSF CW A) delivered the highest overall treatment performance. Hydraulic retention times (HRT) varied from 4.9 days (6-month operation) to 2.9 days (12-month operation); after twelve months of continuous operation, kinetic coefficients reached 0.37 d^{-1} for

biological oxygen demand (BOD) and 0.41 d^{-1} for chemical oxygen demand (COD). Observed removal efficiencies amounted to 97.4% for turbidity, 97.2% for total suspended solids (TSS), 97.5% for BOD, 94.95% for COD, 98.2% for total nitrogen (TN), and 96.5% for total phosphorus (TP). The SSF CW A system satisfied effluent quality thresholds specified under Mexican regulatory standard NOM 001 SEMARNAT 2021, confirming the high treatment potential of this plant species combination.

Keywords: BOD, COD, removal efficiency, kinetic coefficient.

Introducción

La contaminación del agua produce efectos nocivos como daños a los recursos naturales, riesgos para la salud humana y deterioro de la calidad del agua destinada a la agricultura, la industria, los usos recreativos o el abastecimiento doméstico (SEMARNAT, 2020). Recientemente, se ha estimado que países en vías de desarrollo se quedarán sin agua en 2050, esto no sólo causa preocupación en las comunidades, sino que también es un desafío para el quehacer científico, en encontrar nuevas formas de reciclar las aguas residuales (Mthembu, et al., 2013). Se han implementado una gran variedad de tratamientos convencionales y naturales innovadores. La mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales han resultado inviables económica, técnica o ambientalmente; ya sea en sus fases de construcción, operación o mantenimiento, haciendo recomendable desarrollar tecnologías apropiadas, que sean económicas, eficientes y confiables (Navarro y Delgado, 2021).

Una de las alternativas que en los últimos años se han estado estudiando son los Humedales Construidos (HC), los cuales son sistemas poco profundos, en los que se siembran plantas acuáticas y se aprovechan los procesos naturales para depurar el agua residual (CONAGUA, 2016). Los HC son una opción para pequeñas comunidades rurales donde no se cuentan con los sistemas de tratamiento, ya que pueden ser operados con poco o nulo consumo de energía y su mantenimiento no es muy especializado (Chung et al., 2008). Los HC se presentan como una tecnología para el tratamiento principal o complementario (terciaria) de aguas residuales, principalmente en los casos donde resulta difícil construir, operar o mantener adecuadamente los sistemas de tratamiento convencionales (Quintero, 2014).

Dentro de los HC se fijan diferentes especies de plantas, las cuales son la base del proceso, ya que en conjunto con los microorganismos son capaces de degradar, absorber y asimilar en sus tejidos materia orgánica y nutrientes, además de que proporcionan una extensa superficie donde se facilita el crecimiento bacteriano. Los

HC tienen la facilidad de retener los elementos sólidos en suspensión, ya que funcionan también como un medio filtrante al utilizar grava como medio de soporte (Vymazal, 2018).

El presente proyecto se enfocó en el estudio de una especie poco conocida en la fitorremediación de aguas residuales llamada *Acrostichum danaeifolium*, en conjunto con una vegetación antes probada, *Typha dominguensis*, en humedales construidos de flujo libre (HCFL) y humedales construidos de flujo subsuperficial (HCFS) a escala piloto. Estas dos especies se encuentran en simbiosis en el medio natural en áreas de humedales naturales de Tabasco. Se evaluó el coeficiente cinético y la remoción de contaminantes básicos (DBO, SST, OD, Turbiedad, Color, CE, POR, NT, PT) y finalmente el cumplimiento de la normatividad ambiental NOM-001-SEMARNAT-2021. Del mismo modo, se documentó la factibilidad de manejo de la especie dentro de los humedales, pues estas unidades están diseñadas para comunidades descentralizadas y vulnerables del sureste de México.

Materiales y métodos

Unidades experimentales. Las unidades se encuentran instaladas en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) (Figura 1), ubicada en el Km. 05 de la carretera Villahermosa-Cárdenas entronque con Bosque de Saloya. El campus tiene una población de 2400 personas diariamente. Las unidades constan de tanques de control con capacidad de 200 L y 12 HC bajo criterios constructivos de López et al., (2014), de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 1 m altura con 0.5 m de tirante, alimentados con agua residual proveniente de las instalaciones sanitarias de la DACBiol. Para la distribución y alimentación del agua residual se utilizó una bomba de ¼ de HP y tubería de PVC hidráulico de 1 pulgada, los tanques receptores se colocaron sobre una columna de concreto a una altura de 1.0 m, permitiendo la distribución del agua residual por gravedad.

A los HCFS se les colocó 0.5 m de grava como medio de soporte y a los HCFL 0.2 m. La grava que se empleó fue de canto de río y se colocó de manera tal que se aprovechara como medio filtrante y soporte para las raíces de las macrófitas. El medio de soporte presentó una densidad real de 2420 ± 140 (kg/m³), porosidad 35 ± 7 (%), diámetro de partícula 2.5 ± 0.6 (cm). Los HC operaron con 198 ± 42 L/día. Se sembraron en ambos tipos de humedal 12 ejemplares de *A. danaeifolium* y 12 de *T. dominguensis*, ambas macrófitas son enraizadas emergentes, lo cual permite tener la raíz sembrada desde el inicio del sustrato. Se sembraron con una distancia de 15 cm aproximadamente de manera triangular o tresbolillo (García Ramírez, 2020).

Muestreo y caracterización del agua. El muestreo presentado se realizó después de un año de operación del sistema de tratamiento, para lo cual se monitoreó un total de cuatro semanas tomando una muestra simple diaria, siendo un total de 28 muestras. Para la determinación de los parámetros analizados se utilizaron los equipos de análisis siguientes: la turbidez se obtuvo por medio de un turbidímetro Hanna HI98703 con precisión de 0.01 NTU (SM 2130B), el color fue medido con el equipo LaMotteMR TC-3000 (SM 2120B). La temperatura (SM 2550), CE (SM 2510B) y pH (SM 9040b) fueron medidos con el equipo Hanna combo HI98129. En la determinación de la DBO (SM 5220-B), DQO (SM 5210-B), nutrientes (N y P, SM 4500-N) y sólidos (NMX). El caudal fue estimado por el método directo volumen sobre tiempo (Briones y García, 2014), monitoreando 10 días y cada día está compuesto por seis aforos medidos durante las horas de operación (8:00 a 18:00 horas).

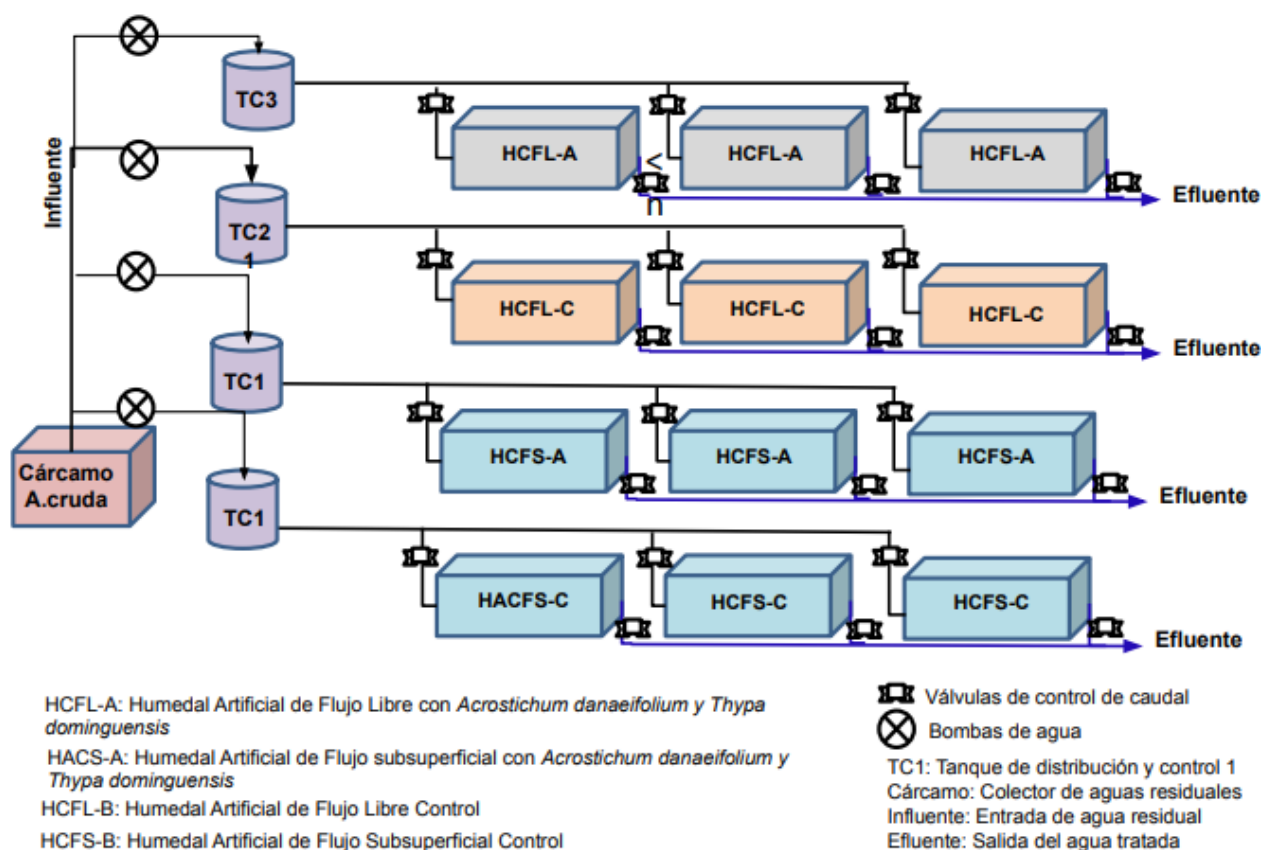


Figura 1.- Distribución de las unidades de tratamiento en el experimento.
 Fuente: Elaboración propia.

Caracterización de las especies. A las especies se le determinó biomasa vegetal (kg), altura (m), largo hoja (cm), ancho hoja (cm), diámetro tallo (cm) y largo raíz (cm)

(García Ramírez, 2020). Estas determinaciones se realizaron en operación normal después de un año de funcionamiento.

Diseño Experimental. Se trabajó con un análisis de varianza que incluye un nivel, los tipos de flujo y cada tratamiento contó con su réplica por triplicado. Para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para este proyecto se utilizó el paquete estadístico STARGHAPIC 18 MR. Se aplicó un análisis estadístico ANOVA para los datos paramétricos y un análisis de varianza Kruskal-Wallis para los datos no paramétricos.

Tiempo de retención hidráulica. El tiempo de retención hidráulico (TRH) se determinó para los gastos de operación mediante la ecuación siguiente (Crites y Tchobanoglous, 2004):

$$t = nhAs/Q$$

Dónde:

n= porosidad

h=profundidad de la lámina del agua

As= área del humedal

Q=gasto promedio

Eficiencia de remoción. La eficiencia de remoción se calculó mediante la siguiente ecuación (García Ramírez, 2020):

$$\text{Efic. Rem (\%)} = (C_e - C_s) / C_e \times 100$$

Dónde:

C_e=Concentración de entrada (influyente)

C_s=Concentración de salida (efluente)

Cinética de degradación. Debido a que los sistemas de HC son reactores biológicos, su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo pistón, estimándose la constante de reacción k y la concentración del efluente de DBO₅ (Quintero, 2014; Crites y Tchobanoglous, 2004):

$$C_e = C_o e^{-kt}$$

Dónde:

C_e= concentración del contaminante en el efluente (mg/L)

C_o= concentración del contaminante en el influente (mg/L)

k= constante de reacción (d⁻¹)

t=tiempo de retención hidráulica (día)

Modelado de la distribución de contaminantes. Una vez identificado el HC con mejor desempeño se procedió a realizar el modelado, para ello se monitoreó y analizó el promedio diario de cada punto de muestreo referente a variables como pH, temperatura, color, turbiedad, conductividad eléctrica y biomasa (microorganismos). La distribución de los contaminantes dentro del reactor se trazó utilizando el software Surfer 8.0, que permite determinar la distribución espacial dentro de un sistema de coordenadas basado en una interpolación lineal y un diagrama cuadrático (mapa de isoconcentración).

Biomasa en el medio de soporte. La biomasa, es referida a la cantidad de microorganismos en las rocas, esta se midió al reactor más eficiente mediante gravimetría adaptando el método de sólidos volátiles totales (SVT) a una muestra del medio de soporte en cada punto de muestreo dentro del HC (Figura 2).

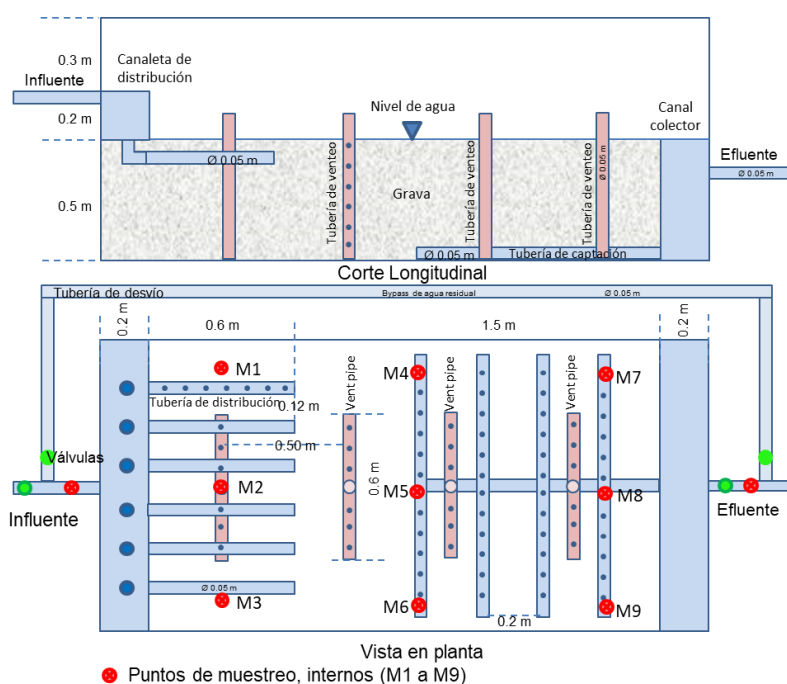


Figura 2.- Vista en planta y corte longitudinal de la unidad experimental con puntos de muestreo internos. Fuente: López et al., (2014).

Resultados

Gastos de operación. La alimentación de agua residual cruda a las unidades de tratamiento presentó variación en el caudal en función a las horas del día y por día (Figura 3). La descarga general presenta un Q_{med} de 198.0 m³/día, un Q_{min} de 100.0 m³/día y un $Q_{maxinst}$ de 280.0 m³/día. Durante la etapa de arranque se evaluó el tiempo de retención hidráulica con el Q_{med} obteniendo para el HCFL de 6.52 días

y para el HCFS con 4.93 días. Estos valores de TRH están dentro de los criterios de diseño para HC establecidos por Arias (2005), Kadlec y Wallace (2009) y recientemente CONAGUA (2016 y 2019a).

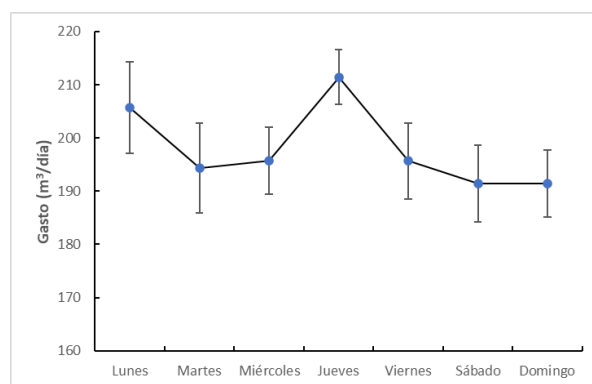


Figura 3.- Valores promedio diario del Gasto de operación ($N=60$), suministrado a los HCFL y HCFS.

Fuente: Elaboración propia.

Tendencias de la calidad del agua. Es importante recordar que los resultados presentes corresponden a un año posterior a la estabilización del sistema. El valor de pH se encuentra dentro los LMP de referencia en todos los tratamientos, del mismo modo la temperatura es menor a 35°C, estando dentro los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. En cuanto a la CE los efluentes de los tratamientos están dentro de los LMP de NADF-003-AGUA-2002. En cuanto a los parámetros como DQO, NT y PT sólo se cumplieron en el tratamiento HCFS-A, como se muestra en la Tabla 1. En el caso particular del parámetro color aparente, en México no hay criterio o norma de referencia, sin embargo, se determina al ser un parámetro de control de procesos en diferentes sistemas de tratamiento (Ortíz et al., 2018).

Tabla 1.- Valores promedio ($\pm DE$) de los efluentes de tratamientos evaluados.

Parámetros	A. Cruda		HCFL-A		HCFL-C		HCFS-A		HCFS-C		LMP	Ref.
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.4	0.1	8.3	0.2	7.6	0.3	8.3	0.2	7.5	0.1	6-9	A
Temp. (°C)	25.8	1.1	26.2	1.8	27.6	0.9	25.9	1.5	27.4	0.8	35	A
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1187.7	189.4	963.1	94.0	930.0	89.2	894.7	59.1	888.2	95.5	1000	C
Turb. (UNT)	104.6	27.4	37.6	23.1	55.9	13.6	3.1	1.1	59.5	6.0	5	B
Color (UC)	1351.2	344.7	591.2	192.8	575.9	73.1	117.2	42.2	607.7	74.9		
SST (mg/L)	282.4	73.9	100.2	61.9	141.4	30.1	8.4	3.1	144.3	26.4	20	A
DBO (mg/L)	321.9	84.2	113.8	70.7	109.8	19.7	9.6	3.5	108.5	31.5	30	D
DQO (mg/L)	804.8	210.6	284.5	176.7	246.9	35.8	24.0	8.8	282.6	46.0	100	A
NT (mg/L)	171.2	44.8	61.1	37.6	88.0	7.7	5.1	1.9	85.3	9.3	15	A
PT (mg/L)	6.4	1.7	2.3	1.4	3.8	0.5	0.2	0.1	3.7	0.5	5	A

A= NOM-001-SEMARNAT-2021, B=NADF-003-AGUA-2002, C= Criterios ecológicos de calidad del agua de 1989, D= NOM-001-SEMARNAT-1996. Fuente: Elaboración propia.

La prueba de Kruskal-Wallis para pH (H) reportó que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Usando el procedimiento de Bonferroni, 6 de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95.0%. El valor mediano $\pm$ rango intercuartil ($\pm$ RI) más bajo para pH se encontró en el tratamiento HAFS-C con $7.6 \pm (Q_1=7.5, Q_3=7.6)$, seguido de HAFL-C con $7.7 \pm (Q_1=7.4, Q_3=7.9)$ y finalmente el valor mediano más alto se encontró en A. Cruda con $8.4 \pm (Q_1=8.3, Q_3=8.5)$ (Figura 4). En cuanto a la temperatura el ANOVA encontró que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Temperatura ($^{\circ}$ C) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El promedio más bajo ($\pm$ DE) se encuentra en A. cruda con $25.8 \pm (\pm 1.1)^{\circ}$ C, seguido de HCFS-A con $25.9 \pm (1.5)^{\circ}$ C y la temperatura promedio mayor en HCFL-C con $27.6 \pm (0.9)^{\circ}$ C. En cuanto la eficiencia de remoción mayor de pH fue en el HCFS-C con 10.2% y la menor en el HCFL-A con 0.8%. En la temperatura la eficiencia es negativa en todos los tratamientos, el valor del efluente es mayor a la del afluente lo cual en este parámetro indica mayor actividad microbiana (Figura 5).

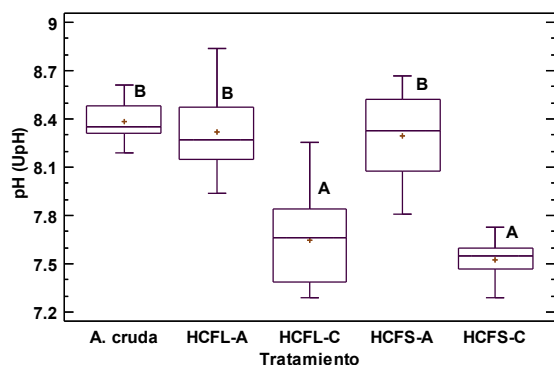


Figura 4.- Valores medianos de Ph (N=28). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

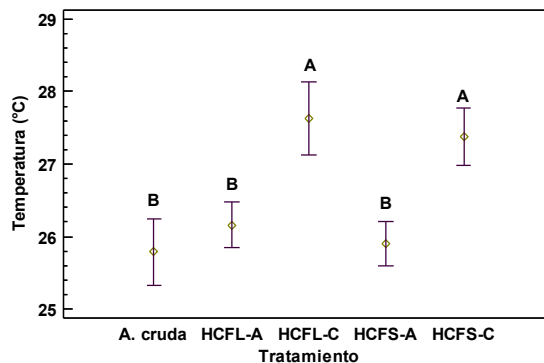


Figura 5.- Valores promedio de temperatura (N=28). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de las medianas de CE (μ S/cm) se encontró que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Usando el procedimiento de Bonferroni, 6 de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95.0%. El

valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HCFS-C con $884.0 \pm (Q_1=797.5, Q_3=959.3) \mu\text{S/cm}$, seguido de HCFL-C con $889.0 \pm (Q_1=861.4, Q_3=1039.1) \mu\text{S/cm}$, y el valor mediano más alto se encontró en A. cruda $1266.0 \pm (Q_1=946.6, Q_3=1303.1) \mu\text{S/cm}$ (Figura 6). En cuanto a la turbiedad puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encontró en HCFS-A con $3.2 \pm (Q_1=2.3, Q_3=3.6) \text{ UNT}$, seguido de HCFL-A con $39.7 \pm (Q_1=17.2, Q_3=55.2) \text{ UNT}$, finalmente el valor mediano más alto se encontró en A. cruda con $98.65 \pm (Q_1=83.7, Q_3=125.1) \text{ UNT}$ (Figura 7). La eficiencia de remoción mayor de CE fue en el HCFS-C con 25.2% y la menor en el HCFL-A con 18.9%.

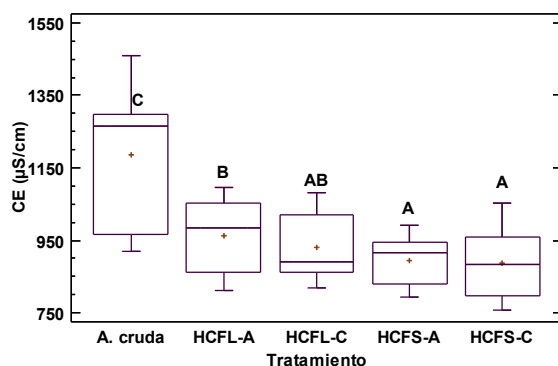


Figura 6.- Valores medianos de CE ($N=28$). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

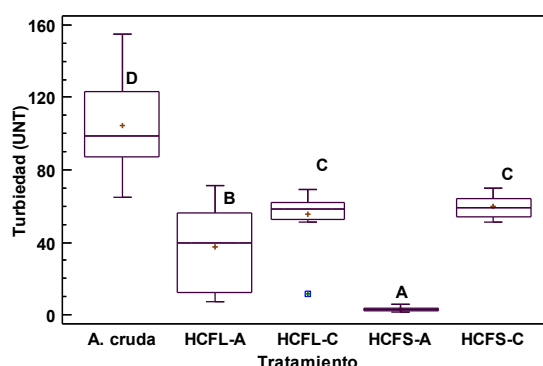


Figura 7.- Valores medianos de Turbiedad ($N=28$). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al parámetro de Color (UC), puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HCFS-A con $105.0 \pm (Q_1=89.0, Q_3=134.2) \text{ UC}$, seguido del HCFL-C con $565.0 \pm (Q_1=525.4, Q_3=663.4) \text{ UC}$, y finalmente el valor más alto se encontró en A. cruda con $1421.5 \pm (Q_1=1020.4, Q_3=1682.2) \text{ UC}$ (Figura 8). En el caso de los sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L), el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HCFS-A con $8.6 \pm (Q_1=6.3, Q_3=9.7) \text{ mg/L}$, seguido de HCFL-A con $103.2 \pm (Q_1=46.4, Q_3=149.0) \text{ mg/L}$, y finalmente el valor mediano más alto en mg/L A. cruda con $266.4 \pm (Q_1=226.1, Q_3=337.8) \text{ mg/L}$ (Figura 9). La mayor remoción color y SST se da en HCFS-A con 91.3% y 97.0% y la menor en HCFS-C con 55.0% y 48.9%, respectivamente.

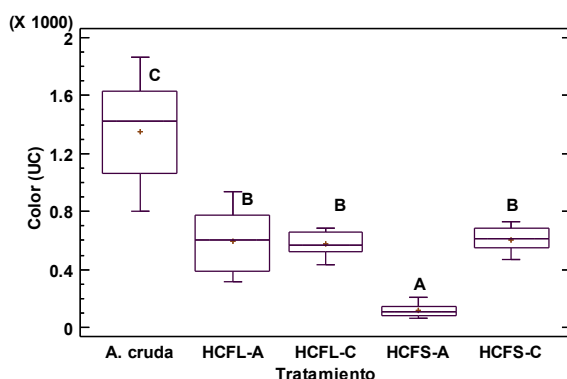


Figura 8.- Valores medianos de Color ($N=28$). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

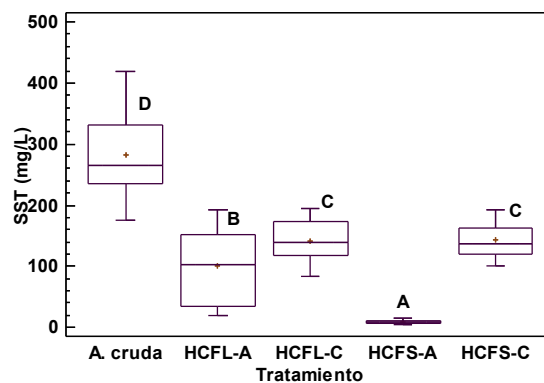


Figura 9.- Valores medianos de SST ($N=28$). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de DBO_5 (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en HCFS-A con $9.8 \pm (Q_1=7.2, Q_3= 11.1)$ mg/L, seguido de HCFS-C con $93.6 \pm (Q_1= 87.2, Q_3= 116.9)$ mg/L, y finalmente el valor mediano más alto se reporta en A. cruda con $303.6 \pm (Q_1= 257.8; Q_3= 385.1)$ mg/L (Figura 10). La prueba de DQO (mg/L) muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en HCFS-A con $24.5 \pm (Q_1=18.0, Q_3= 27.8)$ mg/L, seguido de HCFL-C con $238.8 \pm (Q_1= 206. 7, Q_3= 283.9)$ mg/L, y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en A. cruda con $759.1 \pm (Q_1= 644.4, Q_3= 962.8)$ mg/L (Figura 11).

La prueba de NT (mg/L) indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HCFS-A con $5.2 \pm (Q_1=3.8, Q_3=5.9)$ mg/L, seguido de HCFL-A con $65.0 \pm (Q_1= 28.1, Q_3= 90.4)$ mg/L, y finalmente el valor mediano más alto en el tratamiento A. cruda con $161.51 \pm (Q_1= 137.1, Q_3= 204.9)$ mg/L (Figura 12). En cuanto al PT (mg/L) también existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en HCFS-A con $0.2 \pm (Q_1= 0.14, Q_3= 0.22)$ mg/L, seguido de HCFL-A con $2.4 \pm (Q_1= 1.0, Q_3= 3.4)$ mg/L, y finalmente el valor más alto se reportó A. cruda con $6.0 \pm (Q_1= 5.2, Q_3= 7.7)$ mg/L (Figura 13). La remoción de NT y PT fue de 97.0% en el HCFS-A y 50.2% y 43.1% en el HCFS-C.

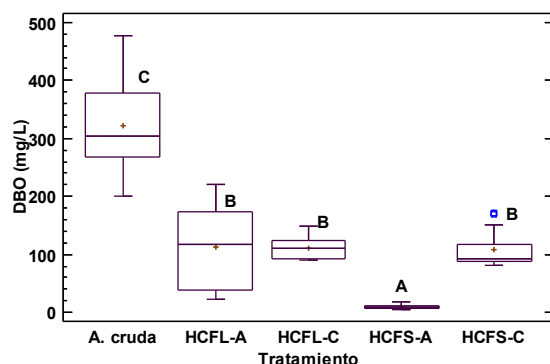


Figura 10.- Valores medianos de DBO (N=28). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

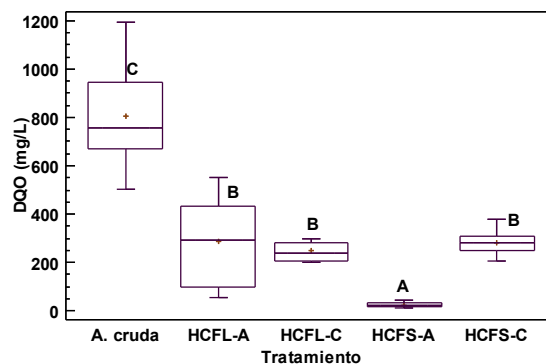


Figura 11.- Valores medianos de DQO (N=28). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

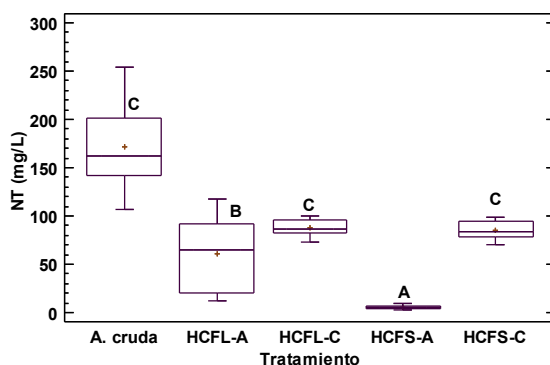


Figura 12.- Valores medianos de NT (N=28). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

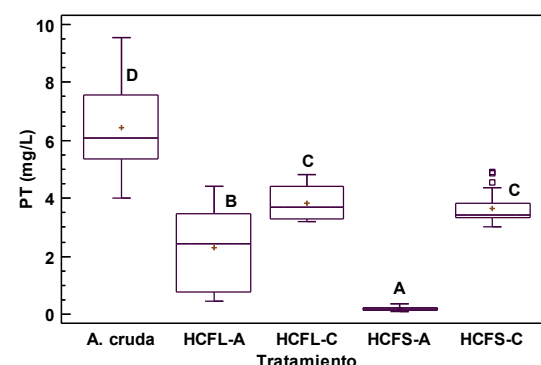


Figura 13.- Valores medianos de PT (N=28). Letras diferentes indican diferencias significativas con un 95% de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento de las especies. Durante el experimento la especie *A. danaeifolium* presentó una rápida adaptación a las condiciones con agua residual en *flujo subsuperficial* ya que en ocho días aparecen nuevas hojas en crecimiento, mientras que en flujo libre el crecimiento de nuevas hojas es a los 15 días. La especie *T. dominguensis*, conocida ya en el uso de HC, mostró una adaptación normal en ambos flujos con nuevas hojas en ocho días. Después de seis meses en el flujo subsuperficial *A. danaeifolium* presentó 12 plantas, mientras *T. dominguensis* empezó a poblar el HC teniendo en total 17 plantas. En flujo libre *A. danaeifolium* redujo su población a 9

plantas, pues la especie no podía arraigar bien al medio en el que se encontraba debido a que su sistema de raíces era muy grande y el medio de soporte en un flujo libre es poco profundo para la especie. En la tabla 2 se muestran las características finales de las especies en ambos flujos.

Tabla 2.- Valores promedio de las especies al inicio y al final de experimento.

Parámetro	Inicial Ambos flujos				Final Flujo libre				Final Flujo subsuperficial			
	A. <i>danaeif.</i>		T. <i>doming.</i>		A. <i>danaeif.</i>		T. <i>doming.</i>		A. <i>danaeif.</i>		T. <i>doming.</i>	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
No. Individuos	12		12		5		29		14		21	
No. Hojas/planta	17.0	4.2	6.0	1.2	14.0	1.6	9.0	2.2	33.0	2.3	11.0	1.1
Altura planta (cm)	124.0	44.1	80.7	14.7	142.1	11.9	226.2	15.3	197.8	27.3	234.6	14.6
Largo raíz (cm)	63.4	18.0	14.9	4.1	48.7	7.8	25.1	6.1	94.4	11.0	27.1	5.7
Ancho raíz (cm)	61.1	15.0	18.2	1.1	44.8	21.0	43.3	1.1	96.6	17.0	43.3	1.1
Perímetro tallos (cm)	7.7	0.4	2.8	0.2	6.4	0.4	2.3	0.6	8.9	0.7	2.9	0.0
Peso planta (Kg)	5.8	3.7	0.5	0.8	6.3	3.1	4.1	0.8	8.7	2.3	3.5	0.9

Fuente: Elaboración propia.

Tiempo de retención hidráulico y coeficientes cinéticos. La especie *A. danaeifolium* y *T. domingensis* se adaptaron exitosamente en el experimento, pero la primera especie tiende a desarrollarse en mayor volumen y tamaño y esto afecta significativamente el TRH en las unidades experimentales. En el caso particular los HCFL redujeron su tiempo de retención de 6.52 días a 5.0 días, mientras en el HCFS de 4.93 días se redujo a 2.90 días. Este fenómeno tiene un efecto directo sobre los coeficientes cinéticos y estos cambian tanto en los HC con especies y con los controles. En la determinación de los coeficientes cinéticos para DBO, DQO, NT y PT, se muestra una K constante en los HCFL-A y HCFL-C, mientras que los HCFS si muestran diferencias para cada parámetro siendo el HCFS-A el que presentó la mayor remoción de contaminantes y los coeficientes cinéticos óptimos tanto en el proceso inicial y al año de operación (Tabla 3).

Tabla 3.- Valores promedio de TRH y coeficientes cinéticos K en el experimento.

Parámetro	HCFL-A		HCFS-A		HCFL-C		HCFS-C	
	6M	12M	6M	12M	6M	12M	6M	12M
TRH (d)=	6.52	5.00	4.93	2.90	6.52	5.25	4.93	3.41
K _{DBO} (d ⁻¹)=	0.16	0.21	0.22	0.37	0.54	0.67	0.22	0.32
K _{DQO} (d ⁻¹)=	0.16	0.21	0.24	0.41	0.54	0.67	0.21	0.31
K _{NT} (d ⁻¹)=	0.16	0.21	0.14	0.23	0.54	0.67	0.14	0.20
K _{PT} (d ⁻¹)=	0.16	0.21	0.11	0.18	0.54	0.67	0.11	0.17

Nota: 6M=comportamiento a seis meses, 12M= comportamiento a un año de operación. Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en los coeficientes cinéticos podemos estimar el comportamiento durante los primeros seis meses y al año de operación en la remoción de DBO₅ (Figura 14 y Figura 15). Dichos comportamientos se consideran únicamente en función al coeficiente, sin embargo, el desempeño del HC también se ve influenciado por el TRH, los microorganismos, la temperatura, las especies, temperatura, entre otros factores (Mthembu et al., 2013), tal como se muestra en los resultados promedio de la Tabla 4.

En la Figura 15 y 16 se muestra la tendencia de DQO en cada uno de los HC del experimento, pues este parámetro al reducirse involucra degradación de material orgánico e inorgánico en las aguas residuales (Raffo y Ruiz, 2014). En cuanto a la DQO, a partir del 2022 se estableció como el parámetro principal para determinar el desempeño en los sistemas de tratamiento en la NOM-001-SEMARNAT-2021. En las Figuras 16 y 17 se muestra que los HCFL-C son los que presentarían un mejor desempeño teórico, sin embargo, estas unidades ~~por si~~ solo operan como lagunas de estabilización, las cuales en la realidad presentan un desempeño menor a los humedales pues carecen del medio filtrante de los HC, entre otros procesos (CONAGUA 2019a y 2019b).

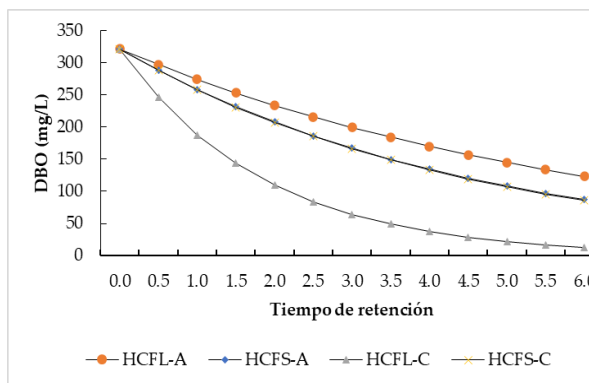


Figura 14.- Degradación de DBO, en los diferentes HC a seis meses de operación.

Fuente: Elaboración propia.

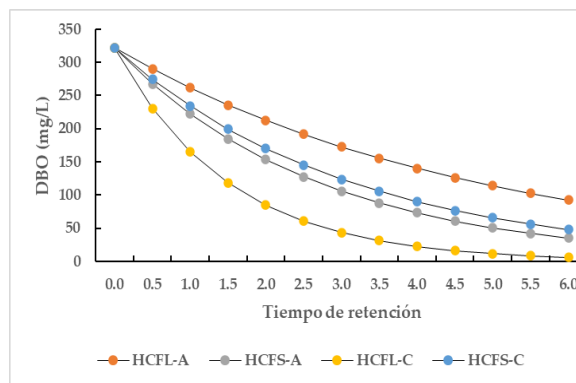


Figura 15.- Degradación de DBO, en los diferentes HC al año de operación.

Fuente: Elaboración propia.

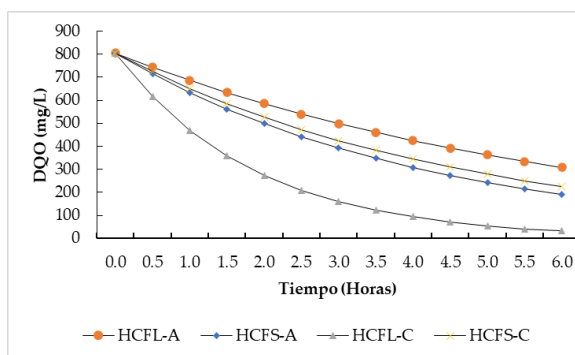


Figura 16.- Degradación de DQO, en los diferentes HC a seis meses de operación.

Fuente: Elaboración propia.

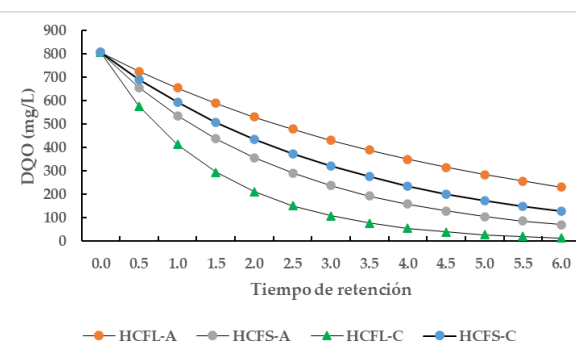


Figura 17.- Degradación de DQO, en los diferentes HC al año de operación.

Fuente: Elaboración propia.

Distribución espacial de parámetros de control y biomasa en el HCFS-A. En la distribución espacial de los parámetros podemos observar que en el pH se observan diferencias mínimas en la distribución espacial pues los valores de entrada son ligeramente alcalino (8.19 a 8.43) (Figura 18), la temperatura presenta variación de entrada a salida de 25.9 a 26.58 °C (Figura 19), esto favorece el crecimiento y estabilización de microorganismos mesófilos, también hay efecto de captación de iones por las especies y la biopelícula (figura 20), pues la CE decrece de 1352 a 849 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y cumple con la especificación para el riego agrícola en México (Vymazal y Kopfelova, 2009). El color aparente decrece de 1350 a 117 UC (Figura 21) y la turbiedad disminuyó de influente a efluente; siendo la combinación de estas especies efectiva en la remoción (Figura 22). Finalmente, la biomasa bacteriana en el medio de soporte muestra que

decrece gradualmente la concentración de microorganismos de influente a efluente, de 33826 a 2446 mg/kg (mg de biomasa sobre kg de medio de soporte). Los parámetros básicos de los contaminantes monitoreados en las aguas residuales para el análisis de distribución espacial se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4.- Valores promedio de los parámetros medidos en puntos internos del HCFS-A.

Puntos	X (m)	Y (m)	pH (UpH)	Temp. (°C)	CE (μs/cm)	Color (UC)	Turb. (UNT)	Biomasa (mg/kg)
M1	0.10	0.42	8.40	25.80	1187.67	1351.22	104.59	18958.71
M2	0.60	0.42	8.41	26.58	1091.36	751.82	21.33	33826.51
M3	1.10	0.42	8.43	26.09	1077.00	549.05	16.10	25089.74
M4	0.10	1.25	8.22	26.25	1003.59	438.68	11.16	8556.83
M5	0.60	1.25	8.22	26.15	973.50	367.59	9.27	5900.41
M6	1.10	1.25	8.19	25.90	1007.45	332.14	7.48	5472.73
M7	0.10	2.08	8.21	26.16	969.05	267.68	5.99	3243.94
M8	0.60	2.08	8.26	26.18	940.64	250.55	4.80	2998.50
M9	1.10	2.08	8.29	25.90	894.73	117.23	3.12	2446.99

Fuente: Elaboración propia.

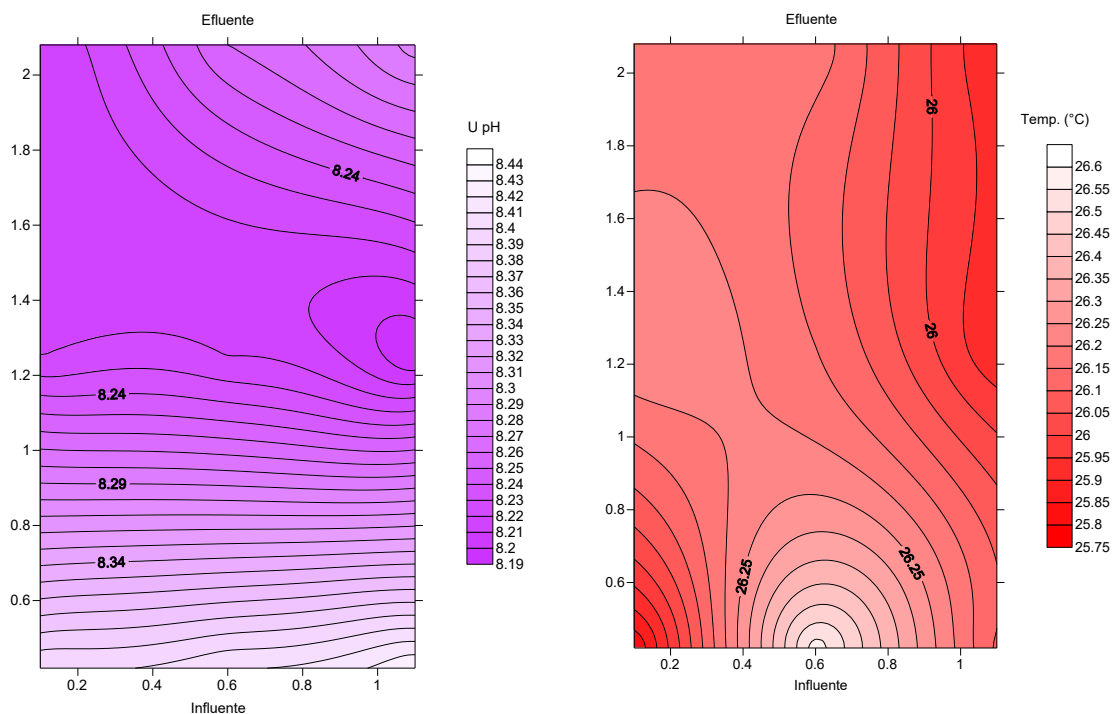


Figura 18.- Distribución espacial de pH (UpH) en el HCFS-A. Fuente: Elaboración propia.

Figura 19.- Distribución espacial de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el HCFS-A. Fuente: Elaboración propia.

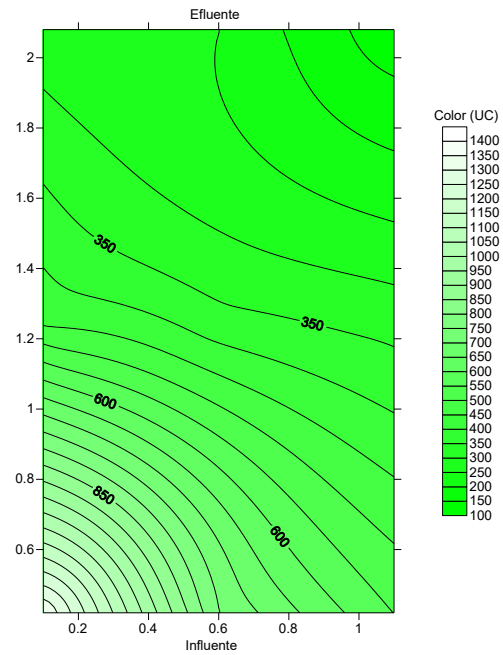
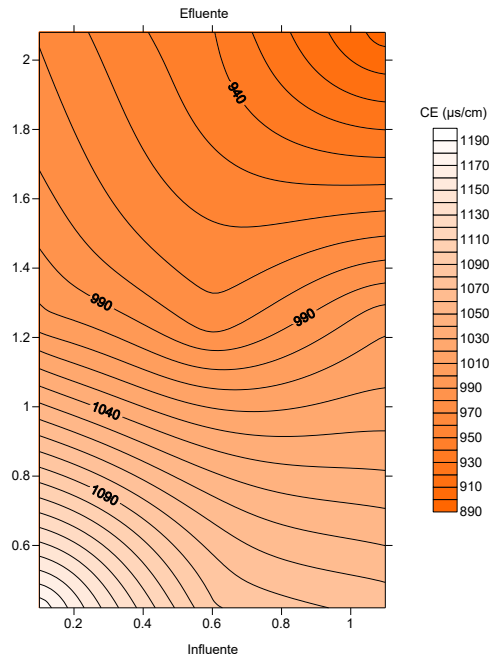


Figura 20.- Distribución espacial de CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) en el HCFS-A. Fuente: Elaboración propia.

Figura 21.- Distribución espacial de Color aparente (UC) en el HCFS-A. Fuente: Elaboración propia.

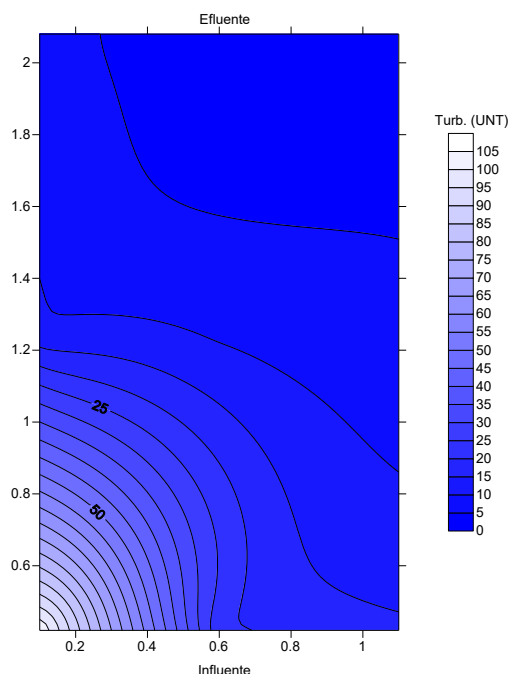


Figura 22.- Distribución espacial de Turbiedad (UNT) en el HCFS-A.

Fuente: Elaboración propia.

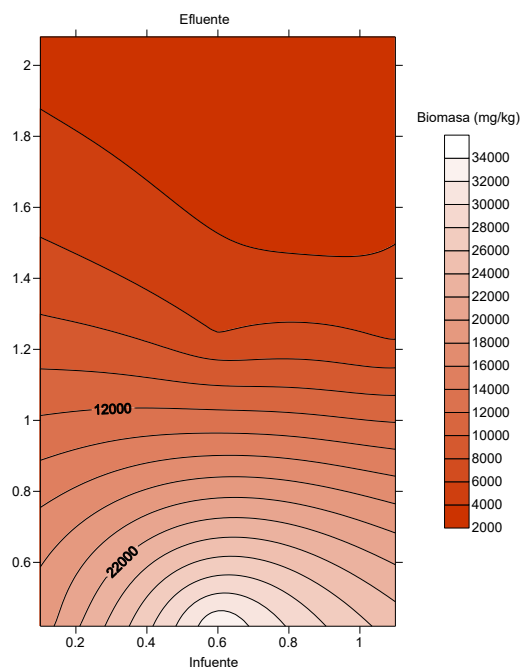


Figura 23.- Distribución espacial de Biomasa (mg/kg) en el HCFS-A.

Fuente: Elaboración propia.

Discusiones

Especies macrófitas.

Vymazal (2011), establece que las macrófitas que mejor se adaptan a los HCFS horizontal son (1) tolerantes a altas cargas orgánicas y de nutrientes, (2) poseen órganos subterráneos ricos (raíces y rizomas) para proporcionar sustrato para las bacterias adheridas y oxigenación de áreas adyacentes a raíces y rizomas, y (3) tienen una alta biomasa aérea para el aislamiento invernal en regiones frías y templadas y para la eliminación de nutrientes mediante la recolección, pues estas serán eficientes en la remoción de sustancias orgánicas y nutrientes (N y P). Las especies de los géneros *Typha* (*latifolia*, *angustifolia*, *domingensis*, *orientalis* y *glauc*) y *Scirpus* (p. ej. *lacustris*, *validus*, *californicus* y *acutus*) spp. son algunas de las especies más empleadas. Del mismo modo recomienda que en países del trópico y subtrópico, se utilicen plantas locales, incluidas especies ornamentales en HCFS.

En el experimento, *A. danaeifolium* cumple con las características sugeridas por Vymazal (2011), pues después de seis meses a un año se observó que en el HCFL-A aumentó sus valores de concentración, favoreciendo un fenómeno de corto circuito debido a la descomposición de *A. danaeifolium* lo cual incrementó la carga orgánica en los resultados (Romellón et al., 2023). Este factor de no adaptación se atribuye a

que el sistema de raíces de la vegetación era demasiado grande para estar en un humedal de flujo libre, lo cual imposibilitaba a la especie para poder sostenerse; aquí queda claro que para esta especie es necesario un medio con mucho mayor volumen, como en el caso del flujo subsuperficial donde la especie logro adaptarse bien y repobló el reactor de manera satisfactoria, haciendo que este fuera el mejor tratamiento.

Potencial de hidrógeno y Temperatura

Los resultados en este experimento muestran que los HC con especies tienen una tendencia en subir el pH pues son ligeramente alcalinos, sin embargo, estos se mantienen dentro del rango de cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021. La variable pH no presenta problema pues el intervalo es adecuado para una favorable proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica. El agua residual con valores de pH inadecuados presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar el valor de pH en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas (Haiming et al., 2015).

La temperatura se mantiene con poca variación durante los tratamientos, esta es importante para el crecimiento de los microorganismos y en el proceso de asimilación de contaminantes por las plantas, se conoce además que las altas temperaturas afectan a la fauna, flora acuática y la velocidad de reacción (degradación). La temperatura que presenta en cada HC son óptimas para una buena remoción de contaminantes básicos ya que cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Delgadillo et al., 2010). Así mismo lo confirma Kadlec y Wallace (2009), quienes afirmaron que la temperatura en un proceso de remoción biológico como este es importante, debido a que debe haber un balance de energía en los procesos microbianos y estos se ven determinados por la estabilidad de la temperatura.

Turbiedad y Color

Este parámetro permite determinar la eficiencia de remoción de nuestro tratamiento de manera inmediata pues tiene una correlación directa con los SST (Crites y Tchobanoglous, 2004). La remoción de turbiedad en este estudio fue mayor en HCFS-A con 97.0% y la menor en HCFS-C con 43.1%. Solís et al., (2016) realizó un estudio en HC a escala piloto, con vegetación *Typha dominguensis* logrando remociones de 96.6% para turbiedad. Así mismo Estrada (2010), midió la turbiedad con *Cyperus* L. removiendo el 55 % en HCFL y 70% en HCFS, mientras que utilizando

Typha d. obtuvo eficiencias de 53.5 % para HCFL y 71.3% para HCFS, siendo este el que mejor resultados alcanzo con estas dos especies y flujos. Comparando con los datos de remoción generados por nuestro mejor tratamiento hay una gran diferencia de resultados.

El color en conjunto con la turbidez son parámetros que están ligados, puesto que en algunos casos dependen de la cantidad de SST que se encuentran dentro del agua residual, si bien la turbiedad y el color no son considerados un factor de riesgo para la salud humana, su remoción del agua tratada favorece la estética y la aceptación de un tratamiento (CONAGUA, 2019c). Por otro lado, su remoción permite que otros métodos de tratamiento del agua resulten efectivos, por ejemplo, la presencia de partículas suspendidas protege a microorganismos del contacto directo con el desinfectante en el caso que se le añada uno (CONAGUA, 2016). Solís et al. (2016) utilizaron HC con dimensiones similares, en la misma región, con TRH similares y en HCFS con *Cyperus articulatus* logro el 88% de remoción y con *Typha latifolia* logrando una remoción de color del 90% y con *Paspalum paniculatum* presentó una remoción de color del 95%. En nuestro tratamiento la mayor remoción color se dio en HCFS-A con 91.3% y la menor en HCFS-C con 55.0%.

Conductividad eléctrica y Sólidos suspendidos totales

La CE no es un parámetro normado en México, sin embargo, en una investigación desarrollada por Barbaro et al., (2018), nos explica que los valores bajos de conductividad evitan problemas de fitotoxicidad en la vegetación y con ello estaríamos evitando mortandad en la vegetación utilizada para los tratamientos. Esta medida indica la facilidad con la que la corriente eléctrica pasa a través del agua residual. Puesto que el agua pura es mala conductora de la corriente eléctrica, las conductividades elevadas indican la presencia de impurezas, y más concretamente de sales disueltas, medir este parámetro es útil en diversos sectores, uno de ellos la agricultura (Castellón et al., 2015). Bajo este contexto nuestros tratamientos cumplen también para la descarga a cuerpos receptores pues son concentraciones menores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CECA, 1989).

Con los resultados obtenidos de SST se cumple con los LMP de la NOM-001 SEMARNAT-2021 sólo en el tratamiento HCFS-A (con 97.0% de remoción) la cual establece que el máximo límite permisible de SST para la protección de vida acuática es de 20 mg/L. La menor remoción se presentó en HCFS-C con 48.9%. Vymazal en 2018 ratifica que los HCFS como el empleado en este experimento, están diseñados principalmente para eliminar sustancias orgánicas y sólidos suspendidos. Tran et

al., (2019), evaluó la remoción de SST con sistemas híbridos combinando estanque facultativo con HCFL y estanque aerobio con HCFS utilizando en los HC la especie *Canna generalis*, logrando remover el 85% de SST en el sistema con estanque facultativo con HCFL y el estanque aerobio con HCFS 97%, demostrando que los HCFS son más eficientes por el proceso de filtración por el medio de soporte que no tienen los HCFL (Vymazal, 2018).

Demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno

El rendimiento de HCFS pueden alcanzar niveles altos de DBO (> 80%), así como niveles significativos de traza orgánica, metales pesados y patógenos (Rajitha et al., 2018; Paraskevopoulos y Smeets, 2019). En este experimento los HC evaluados alcanzaron valores de remoción de 63.21% para el flujo libre y 97.51% para el flujo subsuperficial lo cual indica que al menos el segundo tratamiento logró cumplir los requerimientos marcados por la normativa anterior al 2022 (NOM-001 SEMARNAT-1996) la cual señala 30 mg/L como LMP en aguas residuales tratadas para la protección de vida acuática. Esto muestra que los HCFS son más eficientes pues en el estudio de Tran et al., (2019) el estanque facultativo con HCFL removi6 85% de DBO y estanque aerobio con HCFS 89% de SST. La remoción de DBO y DQO fue de 97.0% en el HCFS-A y 66.3% y 64.9% en el HCFS-C. En la presente investigación el HCFS cumple con el LMP de DQO de la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece la descarga de 100 mg/L. Estos valores son muy similares a los reportados por Romero et al., (2019), pues en su estudio que constó de tres HC en serie con *Phragmites australis*, *Thypha dominguensis* y un tercer mixto de ambas especies, la DQO presentó una mayor remoción durante temporada de estiaje con 95.73% comparativamente con 90.2% en temporada de lluvias.

Nitr6geno y f6sforo totales

Los compuestos nitrogenados constituyen nutrimentos clave para el crecimiento de los seres vivos, así el nitr6geno puede ser eliminado del agua siempre que sea asimilado por microorganismos. Para las plantas el nitr6geno es un nutrimento vital que utilizan en la síntesis de proteínas para su crecimiento, especialmente en forma de nitrato (Martello y Lara, 2012). Para poder determinar de una mejor manera el rendimiento de la vegetación en los HC es necesario mencionar las eficiencias obtenidas en este parámetro y el grado de cumplimiento obtenido; para el HCFL-A 64.3% y para el HCFS-A 97%. En comparación con los resultados obtenidos por Romero et al., (2009) que reporta valores de remoción de 58.69 % y 73.85 % para flujo libre y subsuperficial respectivamente. En cuanto a la normatividad aplicables en el

HCFL-A no se logra alcanzar el LMP impuesto por la NOM-001-SEMARNAT-2021 el cual es 15 mg/l, sin embargo, en el HCFS-A se alcanza el cumplimiento normativo.

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas, siendo su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. Este es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutriente limitante de la productividad primaria, pues en aguas residuales tratadas, estimula el crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutrofización (Delgadillo et al., 2010). El fósforo total presente en el efluente de nuestros tratamientos presenta concentraciones menores a 5 mg/L (LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021), removiendo el 97% en el HCFS-A y el 64% en el HCFL-A. Romero et al., (2009) reporta valores de 21% y 44% de remoción de este parámetro utilizando en ambos casos HC con *Typha dominguensis*. Observando esos resultados y en comparación con los datos obtenidos en esta investigación se denota la amplia diferencia de remoción que hay entre los tipos de flujo, dando el mejor desempeño el HCFS-A. La remoción de fósforo en la mayoría de los sistemas de humedales y con diferentes tipos de especies no es muy eficaz debido a poco contacto entre el agua residual y el medio (Martelo y Lara 2012), aunado a esto si la concentración de entrada de fósforo es muy baja como en nuestro caso, aumentan la probabilidad de una baja remoción de este elemento, lo cual podría justificar el que el humedal de flujo libre tenga menor eficiencia de remoción para este parámetro.

Conclusiones

De acuerdo con los datos finales obtenidos de la biomasa y el comportamiento de las especies utilizadas (*Acrostichum danaeifolium* y *Typha dominguensis*) podemos concluir que *Acrostichum danaeifolium* no es viable en flujo libre, puesto que, para el caso particular del helecho, su sistema de raíces es muy grande, lo que significa que el medio donde esté debe dar soporte para poder afianzarse bien y esto en HCFL es una limitante. Sin embargo, su comportamiento en HCFS es muy diferente, al haber más medio para afianzar raíces la vegetación puede crecer de manera óptima alcanzando niveles de resultados muy favorables.

Los resultados obtenidos en los dos tratamientos fueron positivos, sin embargo, es necesario mencionar aquellos que lograron valores mucho más favorables de lo esperado, como lo fueron los del HCFS-A el cual obtuvo para los parámetros más importantes las siguientes eficiencias; Turbiedad 97.4%, SST 97.2%, DBO 97.5%, DQO 94.95, NT 98.2% y PT 96.5%, mostrando un excelente trabajo en la combinación de las especies.

El agua residual de origen doméstico que fue tratada en el presente estudio logró al menos en el HCFS-A alcanzar una totalidad de cumplimiento en todos los parámetros y límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es aún mucho más rigurosa.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestra Alma Mater, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a la División Académica de Ciencias Biológicas por brindarnos cobijo en sus instalaciones para montar la Planta Piloto de Humedales Artificiales para desarrollar esta investigación. “Estudio en la Duda, Acción en la Fe”.

Referencias

- Arias Isaza, C. A. (2005). Humedales Artificiales Para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Revista Científica General José María Córdov*. 3(3): 40-44. <https://www.redalyc.org/pdf/4762/476259066011.pdf>
- Barbaro, L. A.; Karlanian, M.; Mata, D. A. (2018). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias, 7-14. Ediciones INTA; Instituto de Floricultura, INTA. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/16823>
- Briones Sánchez G., García Casillas I. (2014). *Aforo del agua en canales y tuberías*. Editorial Trillas. 100 p.
- Castellón G., J. J.; Bernal M., R.; Hernández R., M. de L. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*. 19(1): 39-50. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924004.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales artificiales*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUAa]. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales*. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUAb]. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 27. Diseño de PTARM: Lagunas de estabilización*. (<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro27.pdf>).

- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 25. Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. (<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>).
- Chung A.K.C., Wu Y., Tam N.F.Y., Wong M.H. (2008). Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. *Ecological Engineering* (32), 81-89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857407001851?via%3Dihub>
- CECA. 1989. *ACUERDO por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas* CE-CCA-001/89. DOF: 13/12/1989. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0
- Crites R; Tchobanoglous G. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*. Santafé de Bogotá Colombia. 776 páginas. ISBN 0-07-289087-8 Obra completa. ISBN 0958-41-0042-4.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba Bolivia: centro A.G.U.A. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Estrada Gallego I. Y. (2010). *Humedales artificiales de flujo subsuperficial para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías Escuela de Química Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/items/33c98676-cd83-4fa4-8c83-fb312b869f05>
- García Ramírez F. Y. (2020). *Cinética de degradación en aguas residuales domésticas con humedales artificiales utilizando Echinodorus paniculatus*. Tesis de Maestría. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://ri.ujat.mx/handle/20.500.12107/3446>
- Haiming, W., Jian, Z., Huu H, N., Wenshan, G., Zhen, H., Shuang, L., Jinlin, F., y Hai, L. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*. 175: 594-601. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.068.
- Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands*. Second edition. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 348 p.
- López-Ocaña G., Torres-Balcázar C.A., Bautista-Margulis R. G., Hernández-Barajas J. R., Gutiérrez Vidal J. J., de la Cruz-Luna E., Ferrer-Sánchez M. I. (2014). Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En: W. M. Contreras Sánchez, R. Angulo Pineda y F. Morales Hoil (Eds.), *Perspectiva Científica desde la UJAT* (pp. 133-145). Villahermosa, Tabasco. Primera Edición, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 1237 pág.

ISBN:

ISBN:

978-607-606-172-5.

<http://www.archivos.ujat.mx/2014/divulgacion%20cientifica/SDDC2013final.pdf>

- Martelo, J., Lara Borrero, J. A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*. 8(15): 221–243.
- Mthembu MS, Odinga CA, Swalaha FM. and Bux F. (2013). Constructed wetlands: A future alternative wastewater treatment technology. *African Journal of Biotechnology*. 12(29): 4542-4553. DOI: 10.5897/AJB2013.12978
- Navarro Frómata A. E., Delgado Macuil R. J. (2021). *Tecnologías para la gestión sostenible del agua*. D.R. © CLAVE Editorial. Ciudad de México, México. 298 p.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Ortiz-Alcocer V., López-Ocaña G., Torres-Balcázar C.A. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. 7(12): 1-29. DOI: 10.23913/ciba.v7i13.73.
- Quintero Cardoso J. A. (2014). Evaluación de humedales artificiales pilotos de flujo horizontal y tipo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales. *Ingenium*. 15, 29: 85-112.
- Paraskevopoulos, S., Smeets P. (2018). Quantifying the Log Reduction of Pathogenic Microorganisms by Constructed Wetlands: A Literature Review. *Journal Name* 2019, x, x; doi:10.3390/
- Raffo Lecca E., Ruiz Lizama E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*. 17(1): 71-80. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Rajitha J., Rajan, J. S., Sudarsan, S. Nithiyanantham. (2019). Microbial population dynamics in constructed wetlands: Review of recent advancements for wastewater treatment. *Environ. Eng. Res.* 2019; 24(2): 181-190 pISSN 1226-1025. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.127>
- Romellón Cerino, M. J., López Ocaña, G., Reyes Osorio, J., Romellón Cerino, J. C., & Arias Peregrino, V. M. (2022). Efecto de la poda de macrófitas sobre microorganismos adheridos al medio de soporte y la carga orgánica en humedales artificiales. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. 11(21), 1 - 33. <https://doi.org/10.23913/ciba.v11i21.111>
- Romero-Aguilar M., Colín-Cruz A., Sánchez-Salinas E. Y Ortiz-Hernández M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales

- artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (3) 157-167.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n3/v25n3a4.pdf>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2020). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap6_Agua.pdf
- Solís Silván, R.; López Ocaña, G.; Bautista Margulis, R.G.; Hernández Barajas, J.R.; Romellón Cerino, M.J. (2016). 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.
- Surfer 8.0. Powerful Contouring, Gridding, and 3D Surface Mapping Software for Scientists and Engineers. Surfer® Software. E-mail info@sug-surfer.com.
- Tran, H.D., Vi, H.M.T.H., Dang, T.T., Narbaitz, R.M. (2019). Pollutant removal by *Canna Generalis* in tropical constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Global J. Environ. Sci. Manage.* 5(3): 331-344, Summer 2019. DOI: 10.22034/gjesm.2019.03.06.
- Vymazal J, Kopfelova L. (2009). Removal of organics in constructed wetland with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Sci. Total Environ.* 407: 3911-3922.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*. 674, 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
- Vymazal, J. (2018). Does clogging affect long-term removal of organics and suspended solids in gravel-based horizontal subsurface flow constructed wetlands? *Chemical Engineering Journal*. 331, 663-674.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.048>.

Wetland Agriaquaculture® sistema integrado de humedales construidos para producción agro acuícola en México: Diseño y operación

Wetland Agriaquaculture®: design and operational framework for an integrated constructed wetland agri aquaculture production system in Mexico

Elizabeth Delfín Portela, Erick Arturo Betanzo Torres, Luis Carlos Sandoval Herazo, David Reyes González, María de la Asunción Gurruchaga Rodríguez

Resumen

La acuicultura presenta desafíos hacia el futuro, es una industria creciente por la demanda cada vez mayor de pescados y mariscos, sin embargo presenta problemáticas por la contaminación del agua por las descargas de aguas residuales hacia aguas superficiales y al suelo que se generan durante el proceso de cría, engorde, cosecha y procesamiento, además de competir por el uso del agua cada vez con mayor limitación en muchas regiones de México, debido a que este elemento es esencial en el proceso de producción y los datos disponibles indican que el uso del agua en la acuicultura es excesivo, por tal motivo este capítulo muestra un sistema integrado de humedales construidos, para la agricultura y la acuicultura, con un sistema de recirculación diseñado para la producción de *Oreochromis niloticus* en policultivo con *Macrobrachum rosenbergi*, en su diseño se producen variedades agrícolas como son: *Pistia stratiotes*, *Ipomoea aquatica*, *Colocasia esculenta*, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor* y *Typha latifolia*, el sistema tiene tres propósitos: la producción acuícola, agrícola y el tratamiento del agua residual con la tecnología de humedales construidos, que forman en su conjunto un sistema de recirculación de agua acoplado entre los elementos del sistema denominado RAS-CW® por si siglas en inglés Recirculation Aquaculture Systems y Constructed wetland. Este está compuesto por los siguientes componentes: El estanque de producción, un estanque sedimentador, el sistema de tratamiento con humedales construidos y por último un estanque de captación del agua tratada, todos estos componentes son acoplados en un sistema de recirculación acuícola (SRA) donde el agua tratada se reintegra por bombeo al estanque de cultivo. Con este sistema es posible la producción agroalimentaria, aumentar la producción por unidad de superficie y reutilizar el agua, siendo un sistema cerrado de producción que minimiza la descarga de aguas

residuales. Es un sistema de recirculación biológico que minimiza los costos de los sistemas SRA convencionales con un enfoque de economía circular.

Palabras clave: Acuicultura, Sistema de recirculación acuícola, Humedales construidos.

Abstract

Global aquaculture expansion responds to rising consumer demand for aquatic food commodities yet generates substantial environmental risks through polluted effluent discharges into surface water bodies and soils across rearing, fattening, harvesting and post-harvest processing workflows. Aquaculture also intensifies water resource competition within water scarce Mexican territories, where sector level water consumption can be excessive. This chapter introduces Wetland Agriaquaculture®, an integrated constructed wetland based agri aquaculture recirculating system (RAS CW®: Recirculation Aquaculture Systems and Constructed Wetland). The design supports polyculture of *Oreochromis niloticus* and *Macrobrachium rosenbergii*, coupled with cultivation of multipurpose aquatic macrophytes: *Pistia stratiotes*, *Ipomoea aquatica*, *Colocasia esculenta*, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, and *Typha latifolia*. The integrated platform fulfils three core functions: aquaculture output, secondary agricultural production, and wastewater remediation via constructed wetland processes. System hardware comprises culture ponds, sedimentation basins, the constructed wetland treatment module, and a treated effluent collection basin, interconnected within a recirculation loop that pumps purified water back to aquaculture production units. The configuration forms a near closed circular economy production system that maximizes per unit area food output, enables water reuse and minimizes external wastewater discharge. This biological recirculation architecture also reduces capital and operational costs relative to conventional recirculating aquaculture set ups.

Keywords: Aquaculture, Aquaculture recirculation system, Constructed wetlands.

Campo técnico del sistema

En la figura 1 se muestra el sistema diseñado que se engloba en el campo técnico de la acuicultura en tierra con agua dulce y el tratamiento de aguas residuales derivadas de su proceso de producción para la investigación, desarrollo y transferencia tecnológica, para productores de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) y Langostino (*Macrobrachum rosenbergi*), donde el agua es tratada mediante procesos naturales y el agua de desecho del cultivo es reutilizada una vez tratada a través del sistema de humedales construidos.

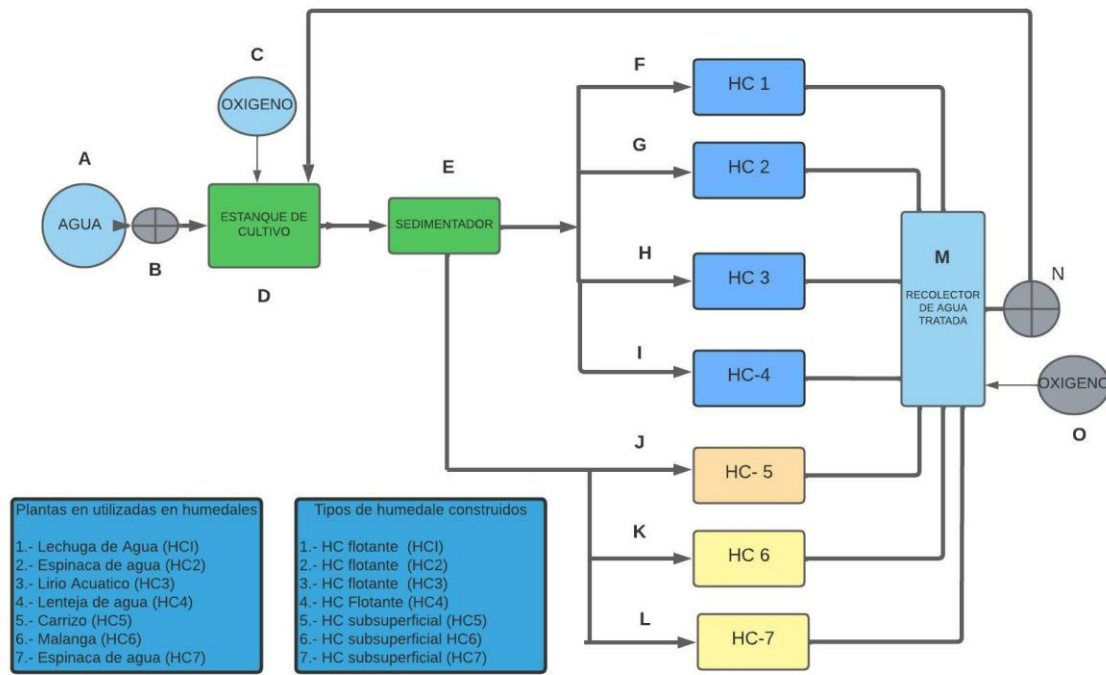


Figura 12. Diagrama de bloques del sistema de recirculación acuícola integrado a humedales construidos

Concretamente, la invención es de base eco tecnológica y biotecnología aplicada que proporciona una instalación integrada para el tratamiento de agua en recirculación, que incluye un módulo de producción de *Oreochromis niloticus* y *Macrobrachum rosenbergi* en policultivo, integrado con oxigenación a través de un blower regenerativo, un módulo de sedimentación over flow del agua procedente del tanque de cultivo, un módulo de tratamiento secundario con dos tipos de humedales construidos, cuatro superficiales y tres de flujo sub superficial (Mitsch y Gosselink, 2007), los humedales superficiales flotantes plantados con lechuga de agua (*Pistia*

stratiotes), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna minor*), los humedales de flujo subsuperficial están plantados con espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), Malanga (*Colocasia esculenta*), la Espadaña (*Typha latifolia*), especies agrícolas comestibles para animales y humanos, es decir con un nuevo enfoque denominado Wetland agriaquaculture®, la eliminación de contaminantes se realiza en los humedales en conjunto con las plantas, posteriormente el agua es recolectada en un estanque donde se oxigena con un blower tipo fuente regenerativo y se rebombea (Recircula) hacia el estanque de cultivo nuevamente, es decir se incorpora con la teoría de la recirculación de agua de los sistemas RAS. El módulo en su conjunto está dispuesto en una línea de recirculación del agua interconectada entre todos los elementos del sistema operando las 24 horas del día, con respaldo de energía eléctrica a través de un generador eléctrico de 5000 watts.

Las clasificaciones donde se enmarcan el sistema son:

- ❖ A01K61/00 Cultivo de animales acuáticos.
- ❖ Y02A40/81 Acuicultura, por ejemplo de peces.
- ❖ C02F3/32 Tratamiento biológico del agua, de las aguas residuales o de las aguas negras caracterizado por los animales o plantas utilizados, por ejemplo, las algas.
- ❖ A01K63/04 Dispositivos para el tratamiento del agua, especialmente adaptados a los receptáculos para peces vivos.

Planteamiento del problema

La utilización de alta tecnología en el sector acuícola mexicano es muy limitada, ya que de las 4623 granjas de tilapia que operan en el país son predominantemente extensivas y semi intensivas (SAGARPA, 2015), generalmente con rendimientos bajos (Magallón et al. 2007) y con un uso ineficiente de los recursos (FAO, 2016).

Es crucial que los avances tecnológicos implementados y probados en el sector acuícola mexicano sean de utilidad y ejemplo para otros productores que buscan nuevas formas de producir. Actualmente el desarrollo ha sido insuficiente. Aproximadamente el 80% de los cultivos que se desarrollan en el país son de tipo extensivo y con rendimiento bajo (Guzmán y Fuentes, 2006; CONAPESCA, 2013; SAGARPA, 2015).

La operación de estos sistemas acuícolas actuales tiene impactos al ambiente por las descargas de las granjas acuícolas con una alta cantidad de contaminantes (Velasco

Amaro et al. 2012; Ferreira et al. 2015; Liu et al. 2020; Jeanson et al. 2022; Macusi et al. 2022; Jiang et al. 2022): el manejo del agua en los sistemas acuícolas necesita de una mayor eficiencia. Por otra parte, la seguridad alimentaria en lo que respecta a la acuicultura juega un papel relevante debido al crecimiento de la población, la cual excede los 7.2 mil 119 millones y continúa en crecimiento (FAO, 2016). Las expectativas indican que para el 2050 seremos más de 9 mil millones de personas, por lo que los sistemas de producción actuales altamente extractivos de recursos naturales (tierra y agua) tienen que cambiar (Godfray et al. 2010). En la actualidad, las ecotecnologías para la producción pueden implementarse en sistemas de producción acuícolas y están disponibles, mismas que puede reciclar el agua y/o combinarlo con sistemas acua-agricolas. Tal y como señalan Barrington et al. (2010), Bene et al. (2016) y FAO (2018), las ecotecnologías serán una necesidad creciente en los sistemas acuícolas en los próximos años. Estos sistemas incluyen, los sistemas de recirculación en acuicultura (Timmons et al. 2009; 2012), los humedales construidos para el tratamiento de afluentes de descarga en acuicultura (Lin, 2002; 2003; Castine et al. 2013; Tepe et al. 2018; Omotade et al. 2019).

Fundamentos Teóricos del sistema

Los Humedales Construidos (HC) son sistemas diseñados para tratar descargas de aguas contaminadas, como las provenientes de estanques acuícolas, municipales e industriales. Utilizan procesos biológicos, incluyendo el uso de plantas fitorremediadoras, para eliminar nutrientes antes de que estas aguas sean descargadas al ambiente o reutilizadas, por ejemplo, en riego agrícola (Lin et al. 2003; Romero-Aguilar et al. 2009; Chen et al. 2009; Vimazal, 2013; Carbo-Bacaicoa, 2012; Alarcon-Herrera et al. 2018; Sandoval et al. 2019). Estos sistemas imitan los procesos naturales de descomposición que tienen lugar en humedales naturales, con el objetivo de eliminar una gran cantidad de nutrientes presentes en el agua (Romero-Aguilar et al. 2009).

Cabe señalar que, para el caso específico de aguas acuícolas, la contaminación del agua por amonio es lo pertinente de eliminar, este se encuentra en promedio en 1 mg/L, estudios de humedales han probado la fácil eliminación de este contaminante con remociones del 30% al 80% (Zhang et al. 2010; Marín-Muñiz, 2017), teniendo incluso la presencia del nutriente a más de 5 mg/L, el cual es utilizado por las plantas para su bioabsorción o bien, utilizado durante el proceso de nitrificación.

A diferencia de los sistemas convencionales de las estaciones depuradoras de aguas y otros sistemas donde el aporte energético ayuda a acelerar los procesos naturales

y los procesos de tratamiento suelen ser secuenciales, en los sistemas de tratamiento naturales los procesos se producen a velocidades consideradas naturales, y suelen realizarse de manera simultánea en un único bioreactor-ecosistema (Carbo-Bacaicoa, 2012).

En acuicultura se plantea el uso de esta tecnología, no solo como sistema final de depuración de las aguas residuales de la granja, sino también como sistema integrado de tratamiento del agua dentro del proceso de recirculación (Zhang et al. 2010; Vimazal, 2013; Carbo-Bacaicoa, 2012). Esta tecnología supone una solución sostenible y ecológica al tratamiento del agua residual, con un efecto positivo sobre el impacto medioambiental. Así mismo esta tecnología permite disminuir notablemente los costos de inversión y de posterior mantenimiento de un sistema tradicional de recirculación. En los sistemas de recirculación en acuicultura (RAS) se aprovechan las bacterias nitrificantes para convertir el nitrógeno amoniacal en nitrato y permiten una alta densidad de cultivo también reutilizando el agua en el mismo sistema, a través de equipos (sedimentadores, filtraciones biológicas, mecánica, aireación, bombeo y desinfección) que tratan el agua para reincorporarlo en el sistema (Losordo et al. 1999; Riche y Garling, 2003; Timmons et al. 2009; 2012; Lasaordo et al 2009; Zhang et al. 2011; Liu et al. 2014). Pero lamentablemente estos sistemas son costosos en su desarrollo y construcción por los múltiples componentes que son requeridos para su operación por las altas densidades de cultivo, son sistemas superintensivos de producción.

Los sistemas de recirculación acuícola (RAS) surgieron para mejorar la eficiencia y productividad, reduciendo la descarga de agua residual (FAO, 2016). En la última década, se han desarrollado dos modelos principales: uno en granjas intensivas y semi intensivas con altos rendimientos, y otro en granjas familiares o cooperativas con rendimientos moderados a bajos (Naylor et al. 2010), aunque tienden hacia la intensificación. Inicialmente implementados en regiones áridas para optimizar el uso del agua, los RAS son sistemas complejos que involucran interacciones físicas, químicas y biológicas (Goddek et al. 2019). Destacan por su alta tasa de reutilización del agua, que puede alcanzar entre un 80% y un 99%, reduciendo significativamente el impacto ambiental y los requerimientos hídricos (Tidwell, 2012). Una estrategia clave para intensificar la producción y minimizar el uso de agua fue el desarrollo de estos sistemas (Badiola et al., 2012), diseñados para recolectar y tratar efluentes mediante procesos microbiológicos y/o mecánicos en biofiltros, permitiendo su recirculación.

Los RAS promueven una producción acuícola sostenible al reducir el uso del espacio y del agua (con solo un 10% de reemplazo) según Verdegem et al. (2006),

especialmente relevante en áreas con recursos hídricos limitados (Piedrahita, 2003; Piedrahita y De Long, 2017). Aunque la inversión inicial es alta debido a los costos de los componentes del sistema, se compensa con las altas densidades de cultivo manejadas (Rurangwa y Verdegem, 2015). Además, eliminan la descarga directa al medio ambiente, mitigando la contaminación en los alrededores de las instalaciones acuícolas (Zhang et al. 2011) y mejorando el manejo de enfermedades mediante el reciclaje de nutrientes (FAO, 2018; Piedrahita, 2003).

Estos sistemas tienen varias ventajas: buscan minimizar la utilización del agua y tratar las aguas residuales basando su tratamiento en principios biotecnológicos para la producción, a la vez que intentan ser económicamente viables con el propósito de incrementar la producción, así como evitar el impacto ambiental por la eutrofización. Es deseable disponer de una instalación de recirculación acuícola con un componente agrícola donde se apliquen los principios antes expuestos, integrándolos y con ello ofrecer a la acuicultura nacional una alternativa para la producción económicamente viable, social mente factible y ambientalmente amigable, ya que estos sistemas normalmente se han utilizado de manera independiente, es decir sin su acoplamiento.

Justificación

La importancia que tiene el desarrollo del presente sistema radica en que está alineado a los programas del Gobierno de México en los siguientes planes y programas: (1) Programa prioritario del gobierno de México: Canasta básica de alimentos: específicamente para el abasto del producto pescado, siendo la tilapia el de mayor consumo por su precio relativamente bajo en comparación con otras especies; Producción para el bienestar. Por otra parte, referente a los (2) Programas Nacionales Estratégicos se apega principalmente: 1. Salud (para promover el consumo de pescado y hacer notar los beneficios a la salud humana) 2. Soberanía alimentaria (para la no dependencia de importaciones de China, ya que se cuenta con todas las condiciones para producir localmente) 3. Sistemas socio ecológicos y sustentabilidad (para la producción sustentable de tilapia) 4. Agentes tóxicos y procesos contaminantes (para minimizar las descargas de aguas residuales provenientes de la actividad) y 5. Agua (para su manejo apropiado, ya que esta actividad requiere del uso exagerado del vital líquido (PUGM, 2020). De este último punto nace la importancia de las nuevas tecnologías para la producción acuícola.

Betanzo-Torres et al. (2019) confirmó que existe en México la producción de Tilapia haciendo uso de los sistemas de recirculación y que ésta es imitada y aislada, aún es

considerada una ecotecnología en desarrollo en el país, por ello los esfuerzos de estas innovadoras invenciones tienen que replicarse. En la actualidad, las ecotecnologías para la producción pueden implementarse en sistemas de producción acuícolas y están disponibles, mismas que puede reciclar el agua y/o combinarlo con sistemas acua-agrícolas., las ecotecnologías serán una necesidad creciente en los sistemas acuícolas en los próximos años, estos sistemas incluyen a la tecnología de humedales construidos y los sistemas de recirculación en acuicultura.

La utilidad o innovación que aporta el sistema en el campo de su ejecución es la de incorporar nuevas tecnologías en las PyMEs acuícolas con el propósito de replicar dichas experiencias con ecotecnologías previo un análisis integral. Las razones del por qué es importante desarrollar el proyecto donde se tendrá un acercamiento a las PyMEs para plantearles reconsiderar aspectos de producción y comercialización para ser aprovechado en la producción acuícola para generar productos únicos, originales y sustentables e influir en las políticas públicas que impulse su desarrollo. Puntualizando que la acuicultura en México es un sector económico importante y que es necesaria una política de investigación que equilibre la generación de conocimiento y aplicación de este en México. El desequilibrio es preocupante: 97% versus 3% (Ceron, 2020).

Estado de la técnica

Algunas patentes relacionadas con sistemas de recirculación acuícola encontradas en Google patents y el IMPI usando la palabra clave “Recirculación acuícola “en español e inglés son:

ES-1275532-U Instalación de recirculación acuícola de agua dulce

Instalación de recirculación de agua dulce del tipo de las que incluyen un módulo de pretratamiento del agua procedente de un tanque de cultivo acuícola, un módulo de oxidación para la eliminación de contaminantes y una recirculación del agua dulce tratada al tanque de cultivo, previo paso por un módulo de postratamiento, caracterizada por incluir además un módulo de generación electroquímica de oxidantes dispuesto en una línea auxiliar, fuera de la línea principal de recirculación del agua dulce tratada, que es alimentado por una línea de recirculación de agua procedente de la salida del módulo de postratamiento, estando el módulo de generación electroquímica de oxidantes desacoplado del módulo de oxidación, en comunicación fluida con éste mediante una línea de alimentación de oxidantes electrogenerados.

MX-2017006322-A Filtro integrado para sistemas de recirculación acuícola

Filtro integrado compacto para sistemas de recirculación acuícola, el cual, consta de 4 etapas de filtración (física, mecánica, mecánica y química - biológica) del agua proveniente de un estanque donde se cultivan organismos acuáticos. Al ser integrado se facilita su manejo, limpieza y mantenimiento. El agua puede entrar al filtro por medio de vasos comunicantes (gravedad) o por bombeo. Limpia el agua del estanque, permitiendo regresar a éste por las condiciones adecuadas para el cultivo de organismos acuáticos. Utiliza poca cantidad de agua, y puede ser utilizado en cualquier sistema de recirculación acuícola. Es escalable de acuerdo con la cantidad de agua que será depurada por el filtro y la carga de biomasa que contenga el estanque de organismos acuáticos.

WO-2019006567-A1 Sistema de tratamiento y recirculación de agua para restablecer la calidad del agua a niveles óptimos en jaulas de piscicultura en agua dulce o salada

Sistema de tratamiento y recirculación de agua para restablecer la calidad del agua a niveles óptimos, en sistema de cultivo de peces orientado principalmente a la industria acuícola tanto en agua dulce como salada y/o centros de acopio, que comprende medios para impulsar flujos de agua a las presiones requeridas, un filtro mecánico grueso con malla de app 100 migras, cuyo foco es capturar el particulado grueso, medios de producción de oxígeno, medios de generación de electricidad autónomo; y medios de control de variables mediante un PLC, que administra variables tales como presión, nivel de oxígeno y CO₂, flujos, pH, entre otros, que comprende: a) medios para ultra filtrar y remover partículas de hasta 0,02 micras, con el objeto de remover macro moléculas de material orgánico, desinfectar bacterias y virus por remoción mecánica y eliminación de contaminantes dañinos como puede ser el amoníaco; b) medios para des gasificar para eliminar el CO₂ producido mediante un intercambiador multitubular con membranas de materias hidrofóbico y micro perforaciones que arrastra el CO₂ a un gas de extracción en condiciones atmosféricas o de vacío; y c) medios para oxigenar el agua mediante un intercambiador multitubular con membranas de materias hidrofóbico y micro perforaciones que inyecta el O₂ de un gas en condiciones atmosféricas al agua.

MX-PA06007857-A Método y sistema para producción acuícola

La presente invención se refiere a un sistema y método de un sistema de acuacultura intensivo para producir tilapia (*O. niloticus*). El sistema tiene un subsistema fotosintético para consumir desechos de especies de producción, un subsistema de producción de alimento para consumir las especies fotosintéticas y ser comidas por las especies de producción. Opcionalmente, las especies de producción de alimento pueden ser hechas en forma de pelotillas u opcionalmente refinar antes de ser consumidas por las especies de producción. Mientras cada subsistema puede tener su propia química de agua, se puede usar un separador de gas para controlar los niveles de gas entre los subsistemas. En una implementación, se usa un anexo con sensor para medir el gas abajo del agua en las especies fotosintéticas. Se pueden transferir agua y especies entre los subsistemas como se desee. Se pueden usar sistemas de acuacultura múltiples en combinación para proporcionar sistemas de edad específica que operan en conjunto entre sí y distribuir el riesgo de enfermedad o falla a través de sistemas múltiples.

MX-2012013992-A Sistema acuapónico para la obtención de organismos acuáticos y plantas, sistema de producción acuapónico (SPA)

El sistema de producción acuapónico (SPA) es un híbrido de recirculación acuícola para la obtención de organismos acuáticos y plantas, que involucra varios elementos y procesos, en donde utilizando el mismo recurso híbrido se cultivan organismos acuáticos y plantas y se aprovechan los procesos bacterianos de conversión de desechos producidos por los primeros a sustancias nutritivas para las segundas. Dentro de un diseño específico del sistema que hace posible la reutilización del elemento híbrido con un impacto ambiental mínimo, y los filtros biológicos incluidos en el diseño proporcionan las condiciones que facilitan y aceleran los procesos naturales para conversión de los desechos de la acuicultura en sustancias nutritivas para las plantas. En el caso del SPA se aprovecha una combinación de dos filtros biológicos, aunados a esto, se consideró la eficiencia del uso, no solo del agua sino también del uso de energía por lo que utiliza una sola bomba de circulación para mover el agua de todo el sistema, además, la de los costos de materiales. Para el correcto funcionamiento del SPA se tiene un sistema de inyección de aire en diferentes puntos, lo que asegura una aireación e intercambio gaseoso para el mantenimiento de la cantidad de oxigenación adecuada para los procesos biológicos e oxidación y desarrollo de seres vivos. Para describirlo claramente, el SPA se divide en cuatro áreas, un estanque para los organismos acuáticos, un depósito de clarificación de agua, el primer filtro biológico (biorreactor), y finalmente el segundo tipo de filtro biológico que a su vez servirá como cama de siembra para albergar a las plantas de cultivo, y de donde el agua clarificada y filtrada retorna al estanque de organismos acuáticos. En este sistema

mismo orden circula el agua dentro del sistema, dando como resultado un proceso cerrado de recirculación lo que evita la contaminación de las fuentes naturales de agua, y al brindarle a las plantas los nutrientes en forma rápida y de fácil obtención, éstas se desarrollan en menor tiempo, lo que produce una producción más rápida y por lo tanto una mayor producción total en el ciclo productivo. Al mismo tiempo, la conversión y remoción de desechos nitrogenados, sustancias potencialmente nocivas para los organismos acuáticos, por parte de bacterias y plantas proporciona a los animales acuáticos un ambiente propicio para su adecuado crecimiento y desarrollo.

ES-2387245-A1 Sistema autónomo de ensayo e investigación en acuicultura

Sistema autónomo de ensayo e investigación en acuicultura que comprende: un tanque de expansión con depósitos separados e independientes de agua dulce y salada, una unidad de recirculación del agua del tanque de expansión que comprende una bomba de recirculación que envía el agua a una unidad de ozonización y a un desgasificador, - medios de conducción del agua del tanque de expansión a una pluralidad de tanques de cultivo que comprenden:- un biofiltro,- una bomba de calor, un bicono de oxigenación, una pluralidad de tanques de cultivo, un recolector de alimento no ingerido - un cestillo-trampa para las puestas por cada tanque de cultivo,- una pluralidad de sensores de parámetros de cultivo, y una unidad de control de entrada de parámetros de cultivo.

MX-2013015227-A Unidad de producción integral de especies acuáticas y variedades vegetales en un sistema acoplado

La presente invención muestra un cultivo acuícola de variedades de peces y vegetales en condiciones intensivas e hiper-intensivas en un sistema de recirculación de agua acoplado, donde se utiliza un Sistema Acuapónico (SA). Cada SA está compuesto a su vez de un componente de recirculación acuícola (CRA) y un componente hidropónico (CH). Con este sistema, es posible mantener la producción, el rendimiento y la densidad de cultivo de peces y plantas en el máximo posible.

MX/a/2017/003605 Sistema de recirculación acuícola para el acondicionamiento y maduración de moluscos bivalvos

La presente invención presenta un sistema de recirculación acuícola para el acondicionamiento y maduración de Tilapia (*O. niloticus*) en un ambiente controlado para que una vez alcanzado su óptimo desarrollo y sean madurados y utilizados como reproductores en otro sistema específico. Por medio del sistema de la presente invención todo el proceso de acondicionamiento/maduración de los Tilapia (*O.*

niloticus) se lleva un tiempo de entre 8 y 12 semanas, después de las cuales los moluscos madurados se encuentran listos para pasarlos a otro sistema para su reproducción.

CN104787895A Sistema de acuicultura de recirculación de tipo autopurificado

La invención divulga un tipo autopurificado recirculación acuicultura sistema que comprende una piscina de cultivo y un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, en donde se accede al cuerpo de la piscina de cultivo al humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal a través de una bomba sumergible y un tubo de entrada de agua al humedal artificial; se accede al humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal al cuerpo de la piscina de cultivo a través de un tubo de salida de agua del humedal artificial; El agua de cultivo se alimenta al humedal artificial desde la piscina de cultivo a través del tubo de entrada de agua del humedal artificial, es tratada por el humedal artificial y fluye de regreso al cuerpo de la piscina de cultivo a través del tubo de salida de agua del humedal artificial, de modo que se consigue la recirculación.

El tipo auto purificador recirculación acuicultura. El sistema descrito por la invención es bueno en generación de flujo y efecto de aireación, alta propiedad de autolimpieza, bajo costo de operación de construcción y estable, simple y conveniente de operar.

Estas patentes que describen sistemas de recirculación acuícola, ninguna de ellas tiene similitudes contundentes con el sistema propuesto planteado, por los siguientes motivos:

- 1.- Es un sistema de producción que utiliza dos especies diferentes para su desarrollo. *Oreochromis niloticus* y *Macrobrachum rosenbergi* en policultivo bajo el enfoque de acuicultura multitrófica integrada.
- 2.- Los sedimentadores utilizados son del tipo over Flow colocado posteriormente del estanque de cultivo.
- 3.- El sistema de tratamiento utiliza diferentes tipos de humedales contruidos, horizontales de flujo libre y horizontales de flujo subsuperficial, conectados en serie a la fuente receptora del agua, tratada, cada humedal tiene su salida independiente y toma de muestras para análisis de agua.
- 4.- El sistema utiliza diferentes tipos de vegetación para la remoción de nutrientes, lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), Espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), Lirio acuatico

(*Eichhornia crassipes*), Lenteja de agua (*Lemna minor*). Los humedales de flujo subsuperficial están plantados con espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), Malanga (*Colocasia esculenta*), espadaña (*Typha latifolia*), especies agrícolas comestibles para animales y humanos, es decir con un enfoque denominado Wthetland agriaquaculture®

5.- El sistema cuenta con un sistema de oxigenación del agua tratada que es reincorporada el estanque de cultivo a través de una bomba de 40w.

6.- Por último, el sistema cuenta con tres niveles tróficos: Primero: Cultivo de peces, Segundo: Cultivo de crustáceos, y Tercero: Cultivo de plantas.

6.- Descripción del agroecosistema integrado con humedales construidos

Con lo descrito anteriormente y en referencia a la figura 2 el sistema de recirculación acuícola acoplado a humedales construidos como medio de tratamiento biológico de aguas residuales acuícolas.



Figura 2. Agroecosistema integrado con humedales construidos RAS-CW®

Incluye una fuente de abastecimiento confiable de agua de calidad (15), el cual es suministrada por una bomba de 1 Hp (17), el estanque de cultivo de 200 L de capacidad (1) el cual es suministrado de oxígeno con dos aireadores oxigenador (blower) (2) de 12 watts Hp, y agua de la bomba (3), un estanque sedimentador de tipo over Flow de 200 L de capacidad (4), el sistema de tratamiento con humedales

construidos, el primer módulo (7, 8, 9) son de tipo flotantes, y el segundo módulo son de tipo subsuperficiales (10, 11, 12) y por ultimo un estanque de captación del agua tratada (15) el cual integra una bombas (17) de 40 watts para reincorporar el agua tratada hacia el estanque de cultivo (1) a la cual se le adiciono un blower regenerativo tipo fuente (2) de 40 watts para la oxigenación del agua tratada. La invención está caracterizada por incluir siete tipo de humedales construidos en paralelo y la red de agua conectada en serie con tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada (13 mm), de esta manera el sistema RAS -CW está constituido de dos módulos, los humedales de tipo flotantes (7, 8, 9) en la sección uno y los humedales subsuperficiales (10, 11, 12) en la sección dos, conectados a una línea conducción de agua proveniente del sedimentador (5), que en su trayectoria esta interconectada y es alimentada desde el estanque de cultivo (1) donde se cultiva Tilapia (*O. niloticus*) y Langostino (*M. Rosembergi*) y realiza su recorrido por una red de recirculación con un flujo de 1 litro por segundo, el tiempo de retención hidráulica del sistema de humedales es de 24 horas.

Las características constructivas de cada etapa son:

1.- El sistema es alimentado por una bomba (17) con potencia de 1 Hp con una carga dinámica total de 92 MCA y 70 L/min de descarga de agua. Esta tiene un diámetro de Succión / Descarga: 1 1/4" con una caja de control para arranque y paro integrada a un pozo profundo de 75 metros.

2.- Estaque de producción (1) constituida por piscina de plástico comprimido ovalada de 210 litros de capacidad para uso rudo en intemperie con dimensiones: Largo 122 cm, Ancho 70 cm y Alto 34 cm con un orificio por en la parte superior para el recambio de agua de 33 mm en PVC.

3.- Un estanque sedimentador Over Flow de solidos (4) construido por un tanque en HDPE (Polietileno de Alta Densidad) con una Altura Total: 92 cm y un diámetro de 59 cm" con capacidad de 200 litros, este tipo de sedimentador es llamado de Over Flow constituido en su interior por: a) Zona de entrada Estructura hidráulica de transición entre el estanque de cultivo, que permite una distribución vertical de los sólidos sedimentables con un flujo dentro del sedimentador con tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada con codo de 90° en posición hacia abajo, este dentro de un tubo PVC de 3" para la no agitación del agua y esta vaya hacia el fondo del estanque.

b) Zona de sedimentación

En el fondo las condiciones de flujo son de abajo hacia arriba para que sedimenten las partículas. La dirección del flujo es vertical en la fase de entrada y salida es hacia arriba, la velocidad es la misma en todos los puntos.

c) Zona de salida

Constituida por otra tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada con un codo de 90° en posición hacia arriba dentro de una tubería de PVC de 3" para que el agua fluya en dirección vertical hacia arriba, conectándose al sistema de distribución de agua hacia los humedales, la velocidad es la misma en todos los puntos, sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas en el fondo

d) Zona de recolección de lodos

Conforme se llena el estaque a su capacidad para depositar los lodos sedimentados, se cuenta en la parte inferior con una tubería acoplada y válvula de $\frac{3}{4}$ de pulgada para su evacuación periódica, que sirve como abono orgánico para productores agrícolas, pero en el exceso de sólidos podría causar problema de taponamientos en el sistema.

4.- El sistema de tratamiento con humedales contruidos (7, 8, 9, 10, 11, 12)

Construido por la mitad de la sección de un tanque en HDPE (Polietileno de Alta Densidad) con capacidad de 200 litros, por lo que el humedal tiene una capacidad de almacenamiento de 100 litros sin medios filtrantes, estos están soportados con en estructura de estructura de PTR 1-1/2" como soporte del humedal con una altura del humedal de 0.53 cm, el área de siembra y de tratamiento del humedal tiene una altura de 0.29 cm. por 0.90 de largo y 22 cm de ancho. El cual tiene como medio de soporte de las plantas una primera capa de roca de rio con un diámetro promedio de la roca de 7 cm y la capa de 10 cm de altura esto para evitar taponamientos en las salidas del agua tratada y una segunda de tezontle rojo con un diámetro promedio de la roca de 2 a 5 cm con una altura de la capa de 12 cm.

Cada humedal cuenta con una válvula de entrada de aguas residual y una salida con tubería de 3/ 4 de pulgada, además de una toma de muestra en la parte inferior a la salida con los mismos diámetros, para el control del nivel se le instaló un sistema con un codo de 90° hacia el nivel deseado, a 5 cm por debajo de la capa de tezontle rojo. La vegetación en los humedales fue la siguiente:

Humedal de flujo libre 1 consta de 12 lechugas de agua (*Pistia stratiotes*), cada 22 cm de distancia, con una altura promedio de 12 ± 1.2 cm.

Humedal flujo libre 2 consta de con *Ipomoea aquatica* (espinaca de agua, cada 10 cm de distancia, con una altura de 12 ± 2.2 cm por medio de guías sumergidas.

Humedal flujo libre 3 consta de 6 individuos de *Eichhornia crassipes* (lirio acuático), cada 22 cm de distancia, con una altura de 18 ± 1.7 cm.

Humedal flujo libre 4 consta de *Lemna minor* (lenteja de agua), el cual se cubrió el 80% del estanque con un diámetro de la lenteja de 1.2 ± 0.5 cm.

Humedal subsuperficial 5 consta de *Typha latifolia* (Espadaña). Con tres individuos a 25 cm de distancia, con una altura de 31 ± 1.4 cm.

Humedal subsuperficial 6 consta de *Colocasia esculenta* (Malanga), cada 20 cm de distancia, con una altura de 10 ± 1.7 cm con 6 individuos.

Humedal subsuperficial 6 se sembró con *Ipomoea aquatica* (espinaca de agua, cada 15 cm de distancia, con una altura de 10 ± 1.5 cm directamente al sustrato con 6 individuos).

5.- Estanque de captación del agua tratada (15)

Constituida por piscina de plástico comprimido ovalada de 210 litros de capacidad para uso rudo en intemperie con dimensiones: Largo 122 cm, Ancho 70 cm y Alto 34 cm en la que llegan por la parte superior al agua tratada de los dos tipos de sistema de humedales a través de dos tuberías de 33 mm en PVC.

6.- El sistema de rebombeo (16, 17) está constituido por una bomba de recirculación capacidad de recircular 1249 litros por hora, a 110 volts, 25 Watts y tuberías de $\frac{1}{2}$ pulgadas, conectadas entre el estanque de captación (15) y el estanque de cultivo (1)

7.- Los sistemas de oxigenación (2, 14)

En el estanque de captación se oxigena con una motobomba sumergible tipo fuente (14) con capacidad de 40 watts a 127 volts, 35 litros por minuto. Carga máxima (metros): 2.5 m, Potencia Watts: 40 W, Voltaje: 1 Fase / 127. Material del cuerpo de la bomba: Tecno polímero abs, y material del impulsor de Nylon. El sistema (2) es con dos bombas inyectora de oxígeno con Venturi con capacidad de 12 Watts, 120Volts, 60 Hz, con un flujo de 1050 Litros por hora, es compacta, completamente sumergible, filtración mecánica y biológica, montura ajustable dentro del estanque.

Tomando como referencia la figura 2, las partes que comprenden el sistema RAS-CW el sistema de recirculación acuícola acoplado a humedales construidos como

medio de tratamiento biológico de aguas residuales acuícolas incluye una fuente de abastecimiento confiable de agua de calidad (15), la cual es suministrada por una bomba de 1 Hp (17) el estanque de cultivo de 200 L de capacidad (1), el cual es suministrado de oxígeno con dos aireadores oxigenador (blower) (2) de 12 watts Hp, y agua de la bomba (15), un estanque sedimentador de tipo over Flow de 200 litros de capacidad (4), el sistema de tratamiento con humedales construidos, el primer módulo (7, 8, 9) son de tipo flotantes, y el segundo modulo son de tipo subsuperficiales (10,11,12), y por ultimo un estanque de captación del agua tratada (15) el cual integra una bombas (14) de 40 watts para reincorporar el agua tratada hacia el estanque de cultivo (1), a la cual se le adicionó un blower regenerativo tipo fuente (2) de 40 watts para la oxigenación del agua tratada.

El sistema está caracterizado por incluir siete tipo de humedales construidos en paralelo y la red de agua conectada en serie con tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada (13 mm), de esta manera el sistema RAS-CW® está constituido de dos módulos, los humedales de tipo flotantes (7, 8, 9,) en la sección uno y los humedales subsuperficiales (10, 11, 12) en la sección dos, conectados a una línea conducción de agua proveniente del sedimentador (4), que en su trayectoria esta interconectada y es alimentada desde el estanque de cultivo (3) donde se cultiva Tilapia (*O. niloticus*) y Langostino (*M. rosembergi*) y realiza su recorrido por una red de recirculación con un flujo de 1 litros por segundo, el tiempo de retención hidráulica del sistema de humedales es de 24 horas.

En la figura 3 se observa el estanque de producción (1) constituida por piscina de plástico comprimido ovalada 210 litros de capacidad para uso rudo en intemperie con dimensiones: Largo 122 cm, Ancho 70 cm y Alto 34 cm, con un orificio por en la parte superior para el recambio de agua de 33 mm en PVC.



Figura 3. Partes del estanque de cultivo.

La figura 4 el estanque sedimentador Over Flow de sólidos sedimentables (2) construido por un tanque en HDPE (Polietileno de Alta Densidad) con una Altura Total: 92 cm y un diámetro de 59 cm con capacidad de 200 litros, este tipo de sedimentador es llamado de Over Flow constituido en su interior por: a) Zona de entrada: Estructura hidráulica de transición entre el estanque de cultivo, que permite una distribución vertical de los sólidos sedimentables con un flujo dentro del sedimentador con tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada con codo de 90° en posición hacia abajo, este dentro de un tubo PVC de 3" para la no agitación del agua y esta vaya hacia el fondo del estanque.



Figura 4. Detalles de sistema del sedimentador del sistema.

En la figura 5, se observa el flujo del agua tratada procedente del sistema de humedales hacia el tanque recolector del agua tratada que es incorporada al estanque de cultivo a través de una bomba recicladora.



Figura 5. Detalles del sistema hidráulico de distribución de agua hacia los HC del sistema.

En la figura 6, para fines de investigación se integraron válvulas de PVC para la obtención de muestras de agua tratada de manera individual por cada HC, colocadas en la parte superior de los humedales de flujo superficial y en la parte inferior de los de flujo subsuperficial.



Figura 6. Detalles del sistema de toma de muestras y control de nivel del sistema.

En la figura 7 se observa el sistema de tratamiento donde el humedal superficial 1 consta de 12 lechugas de agua (*Pistia stratiotes*), cada 22 cm de distancia, con una altura promedio de 12 ± 1.2 cm.



Figura 7. Detalles de sistema de humedales utilizados en el sistema.

Humedal superficial 2 consta de *Ipomoea aquatica* (espinaca de agua, cada 10 cm de distancia, con una altura de 12 ± 2.2 por medio de guías sumergidas.

Humedal superficial 3 consta de 6 individuos de *Eichhornia crassipes* (lirio acuático), cada 22 cm de distancia, con una altura de 18 ± 1.7 cm.

Humedal superficial 4 consta de *Lemna minor* (lenteja de agua), el cual se cubrió el 80% del estanque con un diámetro de la lenteja de 1.2 ± 0.5 cm.

Humedal subsuperficial 5 consta de *Typha latifolia* (Espadaña), con tres individuos a 25 cm de distancia, con una altura de 31 ± 1.4 cm.

Humedal subsuperficial 6 consta de *Colocasia esculenta* (Malanga), cada 20 cm de distancia, con una altura de 10 ± 1.7 cm con 6 individuos.

Humedal subsuperficial 6 se sembró con *Ipomoea aquatica* (espinaca de agua, cada 15 cm de distancia, con una altura de 10 ± 1.5 por directamente al sustrato con 6 individuos.

En la figura 8 se observa el estanque de captación se oxigena con una motobomba sumergible tipo fuente (2) con capacidad de 40 watts a 127 volts 35 litros por minuto. Carga máxima (metros): 2.5 m, Potencia Watts: 40 W, Voltaje: 1 Fase / 127, Material del cuerpo de la bomba: Tecno polímero abs, y material del impulsor de Nylon. El sistema (14) es con dos bombas inyectora de oxígeno con Venturi con capacidad de 12 Watts, 120 Volts, 60 Hz, un flujo de 1050 Litros por hora es compacta, completamente sumergible, filtración mecánica y biológica, montura ajustable dentro del estanque. Por otra parte, el sistema de control de arranque y paro constituido por un interruptor termo magnético de 10 am de una fase alimentado a 100 volts.



Figura 8. Detalle del sistema eléctrico y oxigenación del sistema.

7.-Funcionamiento.

Se observa en la figura 9, una vista general del sistema, donde las flechas indican el flujo del agua desde el estanque de cultivo, sistema de humedales y estanque de captación de agua tratada y la reincorporación al estanque de cultivo.

1

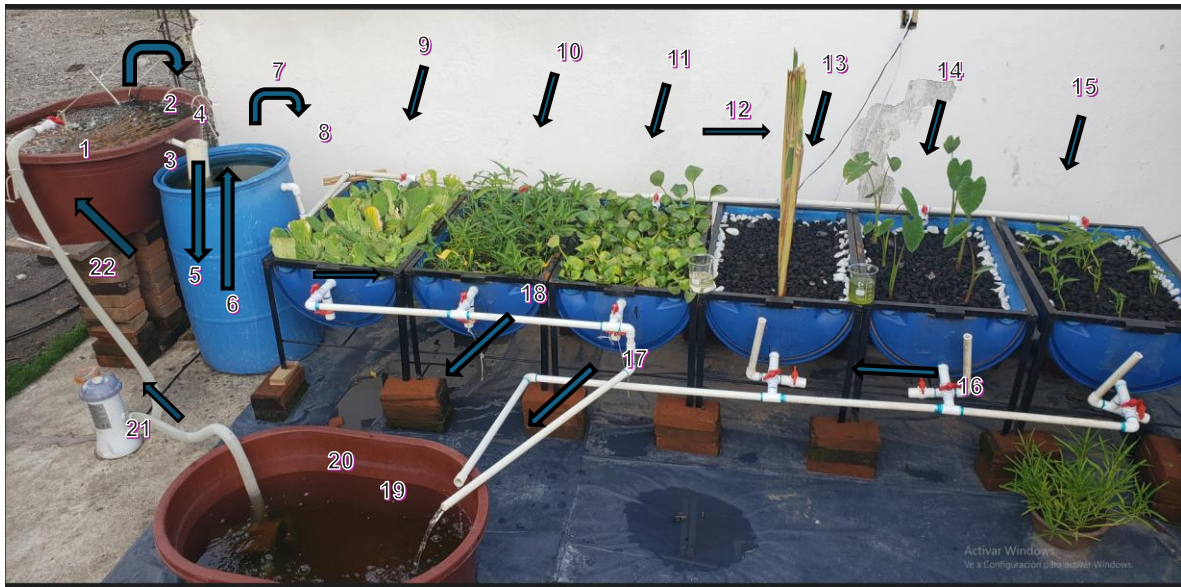


Figura 9. Detalle del flujo de agua del sistema RAS-CW®.

En la figura 10 se observa en un vaso de precipitado {1} de 600 ml la composición original del agua residual y vaso de precipitado {2} con los resultados del tratamiento con una remoción de contaminantes superior al 90%.



Figura 10. Comparación de agua residual acuícola y el agua tratada después de pasar por el sistema de humedales del sistema

Reivindicaciones

Habiéndose descrito las características técnicas del sistema que antecede se acredita propiedad lo contenido en las siguientes reivindicaciones donde la innovación comprende:

1.-Un sistema de recirculación acuícola integrado a Humedales construidos RAS-CW para producción integral de peces, crustáceos y cinco variedades vegetales caracterizado porque la producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) en policultivo con langostino (*Macrobrachum rosenbergi*), en su diseño producen variedades agrícolas como son: lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), malanga (*Colocasia esculenta*), lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna minor*) y *Typha latifolia* (*Espadaña*), la invención tiene tres propósitos: la producción acuícola, agrícola y el tratamiento del agua residual con la tecnología de humedales construidos que forman en su conjunto un sistema de recirculación de agua acoplado entre los elementos del sistema denominado RAS-CW® por sus siglas en inglés Recirculation Aquaculture Systems y Constructed Wateland.

2.- El sistema RAS-CW® para la producción acuícola, agrícola y el tratamiento del agua residual, según la reivindicación 1, CARACTERIZADO porque el componente de recirculación acuícola (RAS), comprende un tanque circular de fondo plano llamado tanque de cultivo de peces (1), que posee en la parte superior un tubo con un desagüe (2); este desagüe (2) del tanque de cultivo de peces, está conectado a un tanque sedimentador (3) por medio de una tubería de PVC (4) que entra al sistema de humedales (5) y tiene una derivación (6) que conduce el agua al componente de tratamiento del agua residual CW (7) del sistema.

3.- El sistema de recirculación acuícola integrado a Humedales construidos RAS-CW® para la producción acuícola, agrícola y el tratamiento del agua residual, según la reivindicación 1, caracterizado porque el componente sedimentador (3) comprende dos canales que se encuentran dispuestos, el primero en la entrada en dirección hacia abajo (5), colocados sobre el tanque (3); los sólidos viajan hacia el fondo, la tubería que sube (6) situados en el otro extremos del tanque, donde el agua sube (6), de manera que entre todos ellos forman flujo continuo de abajo hacia arriba, denominada de tipo over flow y se encuentra conectado al componente de tratamiento con humedales construidos (CW) por medio de un tubo de ¾ de pulgada (8), que es una derivación del tubo que conecta a todos los seis humedales (9, 10, 11, 13, 14, 15) los humedales que contienen un sustrato rocoso o material de soporte (13, 14, 15), para las plantas (13, 14, 15) y que en el fondo contienen roca de

rio (13, 14, 15); para evitar taponamientos, el sustrato que es roca inerte en los que se ancla la raíz de la planta en el caso de los HC de flujo subsuperficial.

4. El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 1 y 3, CARACTERIZADO porque los seis tipos de humedales contruidos (9, 10, 11, 13, 14, 15) se encuentra conectados en serie con el sedimentador, se colocan a 65 cm de altura a partir del piso y 0.050 cm de separación entre ellos para darle a las plantas el espacio adecuado para la no competencia por la luz solar.

5. El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 4, CARACTERIZADO porque cada humedal construido trabaja en conjunto, los canales de alimentación se conectan en serie y son enviadas al estanque recolector de agua tratada (8).

6. El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 1, 3 y 5, CARACTERIZADO porque el componente CW es continuamente abastecido de agua por un tubo de PVC de 3/4 de pulgada (8) provenientes de tanque sedimentador y regresa también por un tubo de PVC (21) al tanque de cultivo del componente de recirculación acuícola (SRA) a través de una bomba recicladora de agua (22).

7. El sistema RAS- CW para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 6, CARACTERIZADO porque el agua proveniente del sistema de tratamiento con CW (16, 18) se incorpora a un tanque recolector del agua tratada a través de un sistema de tubería que los conectan a las seis unidades de tratamiento (17), estos cuentan con orificios circulares con válvula de PVC (16, 18) en su lado superior e inferior, donde se incorpora el agua residual tratada al tanque receptor.

8.El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 1 y 4, CARACTERIZADO por la producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) en policultivo con langostino (*Macrobrachum rosenbergi*), en su diseño se producen variedades agrícolas como son: lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), Malanga (*Colocasia esculenta*), Lirio acuatico (*Eichhornia crassipes*), Lenteja de agua (*Lemna minor*) y la espadaña (*Typha latifolia*).

8. El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 1 y 8, CARACTERIZADO por un módulo de producción de tilapia *Oreochromis niloticus* con una densidad de siembra de 30 organismos por m³

de 1 gramo y langostino *Macrobrachum rosenbergi* en policultivo con una relación de 1 a 1 es decir 6 juveniles de 8 gramos en el estanque de cultivo.

9.- El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 1, CARACTERIZADO, por estar integrado por: Humedal flotante 1, consta de 12 lechugas de agua (*Pistia stratiotes*), cada 22 cm de distancia, con una altura de 12 ± 1.2 cm. Humedal flotante 2 consta de con *Ipomoea aquatica* (espinaca de agua, cada 10 cm de distancia, con una altura de 12 ± 2.2 cm por medio de guías sumergidas. Humedal flotante 3 consta de 6 individuos de *Eichhornia crassipes* (lirio acuático), cada 22 cm de distancia, con una altura de 18 ± 1.7 . Humedal flotante 4 consta de *Lemna minor* (lenteja de agua), el cual se cubrió al 80% del estanque con un diámetro de la lenteja de 1.2 ± 5 cm. Humedal subsuperficial 5 consta de *Typha latifolia* (Espadaña), con tres individuos a 25 cm de distancia, con una altura de 31 ± 1.4 cm. Humedal subsuperficial 6 consta de *Colocasia esculenta* (Malanga), cada 20 cm de distancia, con una altura de 10 ± 1.7 con 6 individuos. Humedal subsuperficial 7 se sembró con *Ipomoea aquatica* (espinaca de agua, cada 15 cm de distancia, con una altura de 10 ± 1.5 directamente al sustrato con 6 individuos. Este enfoque se ha denominado Wateland agriaquaculture®

10.- El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 8 y 9, CARACTERIZADO por estar integrado a un sistema acoplado único en su tipo, que integra tres niveles tróficos, peces, crustáceos y plantas bajo el enfoque de acuicultura multitrófica integrada.

11.- El sistema RAS-CW® para producción integral de peces y variedades vegetales, según la reivindicación 1, 8, 9 y 10, CARACTERIZADO, por incorporar tres tecnologías, los sistemas de recirculación acuícola y el sistema de tratamiento con humedales construidos y la acuicultura multitrófica integrada, a este enfoque se le denominó Watelands agriaquaculture®

Referencias

- Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., y Vidal Sáez, G. C. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. doi <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/10/04/1943>.
- Badiola, M., D. Mendiola, J., Bostock. (2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquaculture Eng.* 51:26–35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004>

- Barrington, K., Ridler, N., Chopin, T., Robinson, S., & Robinson, B. (2008). Social aspects of the sustainability of integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture International*, 18(2), 201–211. doi: <https://doi.org/10.1007/s10499-008-9236-0>
- Béné, C., R., Arthur, H. Norbury, E. H. Allison, M. Beveridge, S. Bush, L. Campling, L., W. Leschen, D. Little, D. Squires, S. H. Thilsted, M. Beveridge, M. Troell, M., Williams. (2016). Contribution of fisheries and aquaculture to food security and poverty reduction: Assessing the current evidence. *World Development*. 79:177–196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.11.007>
- Betanzo-Torres, E. A. (2019). *La Acuacultura en México y el uso de Tecnología Biofloc como Alternativa Sustentable: Análisis de Adopción, Desarrollo y Comparativo con otras Tecnologías para el Cultivo de Tilapia (Oreochromis Niloticus)*, Tesis Doctoral, El Colegio de Veracruz.
- Carbo-Bacaicoa, R. (2012). Integration of wastewater treatment technique through wetlands with recirculation systems for aquaculture. *Revista AquaTIC*, (37), 25–31. doi: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193154818>
- Castine, S., McKinnon, A., Paul, N., Trott, L., & de Nys, R. (2013). Wastewater treatment for land-based aquaculture: improvements and value-adding alternatives in model systems from Australia. *Aquaculture Environment Interactions*, 4(3), 285–300. <https://doi.org/10.3354/aei00088>
- Cerón, A. (2020). *Una nueva versión del PNPC: Luis Ponce Ramírez*. México Ciencia y Tecnología. Consultado el 5 de junio de 2020, en <http://www.cienciamx.com/index.php/sociedad/politica-cientifica/13714-una-nueva-version-del-pnpc-luis-ponce-ramirez>
- Chen, Y.; Bracy, R.; Owings, A. (2009). Nitrogen and phosphorous removal by ornamental and wetland plants in a greenhouse recirculation research system. *HortScience*. 44, 1704–1711. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.6.1704>
- Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J., & Bisogni, J. J. (1993). Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. *Aquaculture*, 112(2-3), 143–155. doi: [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90440-a](https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90440-a)
- Ebeling, J. M., & Timmons, M. B. (2012). Recirculating Aquaculture Systems. En *Aquaculture Production Systems* (pp. 245–277). Wiley-Blackwell. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch11>
- FAO, (2018). *The State of world Fisheries and Aquaculture. Meeting the sustainable goals*. Rome, Italy. 2010 p.
- FAO. (2016). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos*. Roma. 224 pp.

- Ferreira, J. G., Falconer, L., Kittiwonich, J., Ross, L., Saurel, C., Wellman, K., y Suvanachai, P. (2015). Analysis of production and environmental effects of Nile tilapia and white shrimp culture in Thailand. *Aquaculture*, 447: 23-36. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.08.042>
- Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen, G. M. Burnell. (2019). Aquaponics food production systems. combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer. USA. 630 pp. doi:<http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/22883>
- Godfray, H. C. J., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Nisbett, N., Pretty, J., Robinson, S., Toulmin, C., & Whiteley, R. (2010). The future of the global food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2769–2777. doi. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0180>
- Gullian-Klanian, M., C. Aramburu-Adame. (2013). Performance of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings in a hyper-intensive recirculating aquaculture system with low water exchange. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 41(1):150–162. doi: <https://doi.org/10.3856/vol41-issue1-fulltext-12>
- Guzman A., P. y Fuentes C., D, (cord). (2006). *Pesca, acuacultura e investigación en México. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria*. México. 384 p.
- Jeanson, A. L., Gotzek, D., Mam, K., Hecht, L., Charvet, P., Eckerström-Liedholm, S., Cooke, S. J., Pool, T., Elliott, V., & Torres, Y. (2022). *Inland Fisheries Management - Case Studies of Inland Fish*. En *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 343–354). doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819166-8.00170-5>
- Jiang, Q., Bhattarai, N., Pahlow, M., & Xu, Z. (2022). Environmental sustainability and footprints of global aquaculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106183>
- Lin, Y. F., Jing, S. R., & Lee, D. Y. (2003). The potential use of constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for shrimp culture. *Environmental Pollution*, 123(1), 107-113. doi: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00338-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00338-X)
- Lin, Y. F., Jing, S. R., Lee, D. Y., y Wang, T. W. (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture*, 209(1-4), 169-184. doi: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00801-8)
- Liu, X., H. Xu, X. Wang, Z. Wu, X. Bao. (2014). An ecological engineering pond aquaculture recirculating system for effluent purification and water quality control. *Clean Soil, Air, Water* 42:221–228. doi: <https://doi.org/10.1002/clen.201200567>
- Liu, X., Shao, Z., Cheng, G., Lu, S., Gu, Z., Zhu, H., Shen, H., Wang, J., & Chen, X. (2020). Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-

- process perspective in China. *Reviews in Aquaculture*. doi: <https://doi.org/10.1111/raq.12512>
- Losordo, T. M., M. P. Masser, J. E. Rakocy. (1999). *Recirculating aquaculture tank production systems: An overview of critical considerations*. SRAC, Publication. 451-451:18–31 Recuperado a partir de <https://acortar.link/J7IYC>
- Losordo, T., Delong, D., & Guerdat, T. (2009). Advances in technology and practice for land-based aquaculture systems: tank-based recirculating systems for finfish production. En *New Technologies in Aquaculture* (pp. 945–983). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1533/9781845696474.6.945>
- Macusi, E. D., Estor, D. E. P., Borazon, E. Q., Clapano, M. B., & Santos, M. D. (2022). Environmental and Socioeconomic Impacts of Shrimp Farming in the Philippines: A Critical Analysis Using PRISMA. *Sustainability*, 14(5), 2977doi: <https://doi.org/10.3390/su14052977>
- Magallon-Barajas, F.J., Villarreal-Colmenares, H., Arcos- Ortega, F., Civera-Ceracedo, R., Cruz- Hernández, P. (2007). *Desarrollo Sustentable de la Acuicultura en México*. Publicaciones especiales del Centro de investigaciones Bilógicas de Noroeste S.C, Cámara de diputados, LX Legislatura. México 264 p.
- Marín-Muñiz, J. L. (2018). *Humedales contruidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua*. *Agro Productividad*, 10(5). Recuperado a partir de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1028>
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G. 2007. *Wetlands*. Fourth ed. John Wiley & Sons, Nueva York.
- Naylor, S., Brisson, J., Labelle, M.A., Drizo, A., Comeau, Y., 2003. Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: the role of plants and substrate. *Water Sci. Technol.* 48 (5), 215–222. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2003.0324>
- Omotade, I. F., Alatise, M. O., & Olanrewaju, O. O. (2019). Recycling of aquaculture wastewater using charcoal based constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 21(5), 399–404. doi: <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1537247>
- Piedrahita R. H. y De Long D. (2017). *Curso de Sistemas de recirculación en acuicultura*. En 12 foro internacional de acuicultura 2017. Guadalajara Jalisco, México.
- Piedrahita, R. H., (2003). Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*, 226: 35–44. doi: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00465-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00465-4)

- PUGM, (2020). *Portal único del Gobierno de México. Proyectos y programas prioritarios*. Consultado el 5 de junio de 2020, en <https://www.gob.mx/proyectosyprogramasprioritarios>.
- Riche, M., D. Garling. (2003). Feeding tilapia in intensive recirculating systems. Iowa State University. North Cent. Reg. Aquac. Cent. (NCRAC). 1-6 pp. <https://acortar.link/mZq6xE>
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25(3): 157-167. doi: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n3/v25n3a4.pdf>
- Rurangwa, E., & Verdegem, M. C. J. (2014). Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. *Reviews in Aquaculture*, 7(2), 117–130. doi: <https://doi.org/10.1111/raq.12057>
- SAGARPA, (2015). *Situación actual de la acuacultura en Tabasco, problemática y perspectivas de desarrollo a través de la innovación tecnológica*. 128 p recuperado a partir de <https://acortar.link/NUhJG5>
- Sandoval-Herazo, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., y Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. doi: <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Soto-Zarazua, G. M., G. Herrera-Ruiz, E. Rico-Garcia, M. Toledano-Ayala, R. Peniche-Vera, R. Ocampo-Velazquez, R. G. Guevara-Gonzalez. (2010). Development of efficient recirculation system for Tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture using low cost materials. *African J. Biotechnol.* 9:5203– 5211. Recuperado de <http://www.academicjournals.org/AJB>
- Suresh, A. V., C. K. Lin. (1992). Effect of stocking density on water quality and production of red tilapia in a recirculated water system. *Aquac. Eng.* 11:1–22. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(92\)90017-R](https://doi.org/10.1016/0144-8609(92)90017-R)
- Tepe, Y., & Temel, F. A. (2018). Treatment of Effluents from Fish and Shrimp Aquaculture in Constructed Wetlands. En *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment* (pp. 105–125). John Wiley & Sons, Ltd. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119268376.ch5>
- Tidwell, J. H. (2012). *Aquaculture Production Systems*. World Aquaculture society. Willey-Blackwell. John Wiley & Sons, Inc. Iowa, USA. 415 pp. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/9781118250105>
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., y Piedrahita, R. H. (2009). (2002). *Recirculating aquaculture systems* (2ª ed.). Cayuga Aqua Ventures.

- Velasco Amaro, PI, Calvario Martínez, O., Pulido Flores, G., Acevedo Sandoval, O., Castro Rosas, J., & Román-Gutiérrez, AD (2012). Problemática Ambiental de la Actividad Piscícola en el Estado de Hidalgo, México. *Ingeniería*, 16 (3), 165-174.doi: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46725267007>
- Verdegem, M. C. J., R. H. Bosma, J. A. J. Verreth. (2006). Reducing Water Use for Animal Production through Aquaculture. *Int. J. Water Resour. Dev.*, 22:101–113.doi: <https://doi.org/10.1080/07900620500405544>
- Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. *Ecological engineering*, 61, 582-592.doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.023>
- Zhang, S. Y., G. Li, H. B. Wu, X. G. Liu, X.Y. H. Yao, L. H. Tao, L. Liu. (2011). An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquac. Eng.* 45:93–102.doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.08.001>
- Zhang, S.; Zhou, Q.; Xu, D.; He, F.; Cheng, S.; Liang, W.; Du, C.; Wu, Z. (2010). Vertical-Flow Constructed Wetlands Applied in a Recirculating Aquaculture System for Channel Catfish Culture: Effects on Water Quality and Zooplankton. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(5), 1063-1070. Recuperado de <https://www.pjoes.com/Vertical-Flow-Constructed-Wetlands-Applied-r-nin-a-Recirculating-Aquaculture-System,88483,0,2.html>

Soluciones basadas en la Naturaleza para la gestión sostenible del agua: implementación de una biopiscina en un centro ecoturístico de Jalcomulco, Veracruz, México

Nature-based solutions for sustainable water management: implementation of a biopool in an ecotourism center in Jalcomulco, Veracruz, Mexico.

Palacios Arriaga Diana Eliud., Barrera Bernal Clementina

Resumen

Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) constituyen estrategias innovadoras que aprovechan los procesos ecológicos para responder a desafíos sociales, ambientales y económicos de manera sostenible. En los sitios turísticos, una problemática creciente que demanda alternativas de gestión sustentable es el elevado consumo de agua. El presente trabajo analiza la implementación de una biopiscina como una SbN en un centro ecoturístico de Jalcomulco, Veracruz, México. De manera inicial se caracterizaron cuatro hoteles y cuatro centros ecoturísticos, identificando la demanda hídrica asociada a su infraestructura y, particularmente, a las albercas convencionales. Posteriormente, se diseñó, construyó y puso en operación una biopiscina basada en los principios funcionales de los humedales, incorporando vegetación acuática, sustratos minerales y microorganismos asociados para el mantenimiento de la calidad del agua sin el uso de productos químicos. Los resultados muestran que las albercas representan uno de los principales componentes de consumo hídrico en la infraestructura turística local. La implementación de la biopiscina permitió demostrar la viabilidad técnica, ambiental y social de las SbN para reducir la dependencia de tratamientos convencionales y promover el uso eficiente del recurso hídrico. Esta experiencia podría constituir una alternativa replicable para otros destinos turísticos con presión creciente sobre sus recursos naturales y aporta evidencia sobre el potencial de las SbN como herramientas de adaptación y resiliencia territorial.

Palabras clave: Soluciones basadas en la Naturaleza, gestión sostenible del agua, humedales construidos, biopiscinas, turismo sustentable.

Abstract

Nature based solutions (NbS) deploy intrinsic ecological processes to deliver sustainable responses to interconnected social, environmental and economic challenges. Elevated freshwater consumption constitutes a pressing management concern for tourism sector infrastructure. This case study analyses the real-world deployment of a natural swimming biopool — a nature-based solution — within an ecotourism facility located in Jalcomulco, Veracruz, Mexico. Pre implementation baseline characterization assessed water demand profiles across four local hotels and four ecotourism centers, with particular focus on the water footprint associated with conventional chemical dependent swimming pool infrastructure. Guided by wetland ecological principles, a natural biopool was engineered, constructed and commissioned, relying on aquatic vegetation, mineral substrates and native microbial assemblages to sustain bathing water quality without synthetic chemical inputs. Empirical monitoring confirms that conventional swimming pools represent a major contributor to water demand within regional tourism infrastructure. The operational biopool demonstrates technical feasibility, environmental compatibility and social acceptability for nature-based alternatives, lowering dependence on conventional treatment workflows and advancing water resource efficiency. This practical implementation delivers a replicable technical reference for other tourism destinations experiencing growing natural resource pressure and provides empirical evidence supporting NbS as instruments for climate adaptation and territorial socio ecological resilience.

Keywords: Nature-based solutions, sustainable water management, constructed wetlands, natural swimming pools, sustainable tourism

Introducción

Dentro de los graves desafíos globales, la contaminación del recurso hídrico deteriora la salud humana y de los ecosistemas. Esto reduce la disponibilidad de agua dulce y limita los servicios ambientales esenciales, incluida la purificación natural del recurso. El agua es indispensable para vincular el crecimiento económico con el bienestar social. Si bien la agricultura es la actividad primaria con mayor demanda, al requerir más del 70% de la disponibilidad de agua (CONAGUA, 2020), existen otros sectores económicos de gran relevancia, como el turismo y el ecoturismo. Estas actividades demandan grandes volúmenes del vital líquido; sin embargo, aún escasean investigaciones internacionales que precisen sus niveles de consumo.

De acuerdo con la publicación de 2022 del Compendio Estadístico del Turismo en México, en el año 2021, en el estado de Veracruz se registró una afluencia de 4,426,675 turistas nacionales y 188,744 internacionales. Asimismo, en 2022 se reportó una derrama económica de 18 mil millones de pesos, con una afluencia de 10 millones de visitantes y cuatro eventos masivos. Esto posicionó a la entidad en el quinto lugar nacional en captación de turistas y en el segundo en estándares de calidad en el servicio (Noticias RTV, 2022). Al considerar estos últimos datos y un consumo estimado de 300 litros de agua diarios por turista (Gössling et al., 2012; Gössling, 2006), el consumo anual del sector en la región supera los tres mil millones de litros. Dado que el turismo suele concentrarse en zonas urbanas, surge la necesidad de diseñar e implementar infraestructura verde. Entre estas alternativas destacan las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), cuya multifuncionalidad optimiza la gestión hídrica.

Los beneficios colaterales de los enfoques ecosistémicos son un argumento clave para su adopción. En el sector ecoturístico las empresas buscan mitigar riesgos de infraestructura, asegurar el cumplimiento normativo, reducir costos y adaptarse al cambio climático. Por ello, la diversidad de estos beneficios despierta un fuerte interés en una amplia gama de actores y socios potenciales (UNESCO, 2023). Esta investigación identificó un consumo elevado de recursos hídricos en el llenado de piscinas recreativas. Ante este escenario, las albercas naturales o biopiscinas surgen como una alternativa eficiente, ya que operan con sistemas de filtración y tratamiento biológico que mantienen una calidad de agua óptima sin necesidad de vaciar el vaso por completo para los nuevos huéspedes. Como beneficio secundario, este tipo de infraestructura elimina la exposición directa al cloro, así como a los compuestos químicos clarificantes y reguladores de pH que habitualmente se vierten en las albercas convencionales.

Soluciones basadas en la Naturaleza para la gestión sostenible del agua

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), define a las SbN como “acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar los ecosistemas naturales y modificados, para abordar los desafíos de la sociedad de manera efectiva y adaptativa, beneficiando simultáneamente a las personas y la naturaleza” (Drumm et al., 2005).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), se refiere a las SbN como medidas de mitigación o adaptación que brindan soluciones sociales imitando a los ecosistemas que encontramos en la naturaleza, esto puede implicar la conservación o rehabilitación de ecosistemas naturales y/o la mejora o creación de procesos

naturales en ecosistemas modificados o artificiales (UNESCO, 2018). También, se pueden aplicar a microescala (por ejemplo, un inodoro seco) o a macroescala (por ejemplo, el paisaje).

Dentro de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, las SbN contribuyen potencialmente a facilitar el cumplimiento de las metas relacionadas al objetivo 6, Agua y Saneamiento, a su vez impacta de manera positiva en otros ODS, tales como la agricultura sostenible (Hambre y seguridad alimentaria), vidas saludables (Salud y Bienestar), asentamientos urbanos sostenibles (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y en relación con el cambio climático (UNESCO, 2018).

En el ámbito de los recursos hídricos, una SbN utiliza los servicios del ecosistema para contribuir a un resultado de gestión del agua, por ejemplo, se han implementado infraestructuras verdes en zonas urbanas, para gestionar y reducir la contaminación proveniente de escorrentías, se han implementado muros verdes, jardines en azoteas, cuencas de infiltración o humedales construidos, cuyo objetivo es dar tratamiento a la calidad de agua proveniente de descargas sanitarias, estas soluciones utilizan cubiertas de vegetación y de esta manera evitan su llegada a cuerpos de agua, además contribuyen a la biodegradación de contaminantes emergentes.

Todos los principales tipos de ecosistemas o biomas terrestres y la mayoría de los costeros influyen en el agua. La mayor parte de las aplicaciones de las SbN, incluso en los paisajes urbanos, implican esencialmente el manejo de la vegetación, los suelos y/o los humedales (incluidos ríos y lagos) (UNESCO, 2018).

Problemática: Efectos ambientales del consumo de agua en el turismo

El sector turístico es un motor clave para el crecimiento económico global del cual dependen numerosos países. Sin embargo, al ser una actividad con una alta demanda hídrica, genera un impacto significativo en el medio ambiente. En la actualidad, los efectos del cambio climático representan una amenaza latente que se evidencia en el arribo masivo de sargazo a las costas, la erosión playera, y la contaminación de ríos, lagos y lagunas. Estas consecuencias hacen evidente la necesidad de una ordenación adecuada y sostenible en la práctica tanto del turismo convencional como del ecoturismo.

El ciclo hidrológico se desarrolla en las cuencas, las cuales, de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), constituyen las unidades mínimas de gestión del

recurso hídrico (Cotler et al., 2013). Teniendo en cuenta que las zonas urbanas integran a estas unidades, cualquier alteración o contaminación de los recursos naturales en la parte alta de la cuenca repercutirá directamente en la parte baja, impactando ambientalmente no solo a los ecosistemas receptores, sino también a la atmósfera y en consecuencia a la calidad del aire, ya que esta se ve alterada por la dispersión de esporas provenientes de los sitios de vertido y de las propias plantas de tratamiento.

Un caso emblemático de esta dinámica es la localidad de Bacalar, hogar de la laguna de los siete colores, durante años, este sitio mantuvo intacta su composición natural gracias a un estilo de vida apacible y un flujo turístico mínimo. No obstante, tras su declaratoria como "Pueblo Mágico" en 2007 por la Secretaría de Turismo, el destino se transformó en un centro de alojamiento masivo. Esta afluencia trajo consigo una generación crítica de residuos sólidos, un aumento drástico en el consumo antrópico de agua y, por ende, un incremento en las descargas de aguas residuales. Como consecuencia, para el año 2020, las emblemáticas aguas cristalinas de la laguna adoptaron tonalidades verdosas y cafés. Estudios realizados por investigadores del Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) identificaron además la presencia de pesticidas y sustancias químicas vinculadas a la agricultura intensiva, tales como el glifosato (México Ambiental, 2021); otro efecto en zonas potencialmente turísticas es la proliferación masiva de sargazo en el Caribe mexicano, asociada al incremento de nutrientes transportados por los ríos y al cambio climático. Este fenómeno evidencia la necesidad de implementar Soluciones basadas en la Naturaleza que contribuyan a reducir la contaminación, restaurar los procesos ecológicos y fortalecer la resiliencia de los ecosistemas acuáticos (Torres, 2019).

Por su parte, el estado de Veracruz destaca como el tercer estado más megadiverso de México, superado únicamente por Oaxaca y Chiapas, lo que le otorga un enorme potencial turístico. La entidad alberga alrededor de 8,000 especies de plantas, cerca de 1,500 especies de vertebrados (Torres et al., 2010) y 18 tipos de vegetación que abarcan desde los ecosistemas de alta montaña como el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote hasta ambientes costeros como manglares, dunas y arrecifes (Houbron, 2010). A pesar de esta riqueza, la mayoría de sus ríos exhiben indicadores de contaminación. Al aproximarse a las manchas urbanas, la calidad del agua disminuye de inmediato entre un 20% y un 40%. El arrastre pluvial de basura y heces de animales domésticos, sumado a las descargas de aguas residuales urbanas e industriales con tratamiento deficiente o nulo y a las actividades turísticas, aporta una carga de materia orgánica, sólidos y coliformes que compromete severamente los cuerpos de agua. Esta situación se vuelve crítica durante el periodo de estiaje,

cuando disminuye el caudal pluvial necesario para diluir dicha carga contaminante (Houbbron, 2010).

En la localidad de Jalcomulco, el escenario es específico: existen descargas directas de aguas grises sobre el río La Antigua, propiciando zonas visibles de eutrofización. Además, por usos y costumbres de la población, aún se realiza el lavado de ropa en el cauce del río, mientras que los establecimientos de hospedaje carecen de plantas de tratamiento o sistemas capaces de procesar la totalidad del agua consumida. Las aguas residuales de la comunidad se vierten río abajo; sin embargo, en el trayecto del afluente confluyen también las descargas de balnearios, hoteles, centros ecoturísticos, restaurantes y poblaciones vecinas. Dado que el *rafting* es uno de los principales atractivos de Jalcomulco, la práctica de esta actividad recreativa ocurre en aguas que ya muestran un claro deterioro cualitativo.

Finalmente, este flujo hídrico desemboca en el Golfo de México, impactando los ecosistemas marinos como el eslabón más bajo de la cuenca. Cabe destacar que la zona portuaria de Veracruz posee una amplia oferta turística donde el mar representa el principal atractivo recreativo para los bañistas.

Por otro lado, el volumen de agua destinado a las piscinas públicas ejerce una presión significativa sobre el sistema hídrico; este recurso se extrae y se consume de forma antrópica sin una reutilización eficiente. El problema se agudiza al constatar que estas aguas suelen ser devueltas a los cuerpos receptores sin tratamiento previo. En el río Los Pescados (Jalcomulco), la inoperancia de la planta de tratamiento local deriva en la liberación de efluentes contaminados, lo que genera recurrentes brotes de enfermedades gastrointestinales en la población y deteriora los ecosistemas circundantes. Más allá del recurso hídrico, el turismo y el ecoturismo ejercen presión sobre el suelo, el aire y la biodiversidad, elementos que paradójicamente constituyen el atractivo paisajístico del sector.

A medida que el flujo de visitantes se incrementa, la población local y el sector turístico compiten por el agua. En los complejos turísticos se concentra un alto consumo para el llenado de albercas; posteriormente, este recurso clorado y alterado químicamente se integra a las descargas sanitarias que desembocan en los ríos. Estas transiciones demográficas y la urbanización acelerada imponen desafíos complejos a los sistemas de abastecimiento. En el sector ecoturístico, la construcción y operación de biopiscinas u otras infraestructuras sostenibles, además de reducir el consumo de agua potable, disminuye los costos de mantenimiento en albercas convencionales, además, es una infraestructura innovadora capaz de ayudar a posicionar a la región como un destino líder en ecoturismo, atrayendo a un mayor

número de turistas y generando ingresos adicionales. Por lo tanto, analizar detalladamente la demanda hídrica generada por el turismo resulta fundamental para diseñar estrategias de gestión efectivas y regular el desarrollo inmobiliario-turístico, especialmente en regiones con estrés hídrico o conflictos por el uso del suelo (Santacruz De León et al., 2020). Abordar de forma integral esta problemática es indispensable para garantizar un equilibrio real entre el crecimiento económico y la conservación de los entornos naturales que sostienen la actividad ecológica.

Pronóstico sustentable para el consumo del agua del sector ecoturístico

Cuando escuchamos la palabra alberca, muchas personas coincidimos en imaginarnos un sitio de recreación en donde el cloro es parte fundamental de su composición, incluso, estamos acostumbrados a nadar en agua con un olor en particular, sin embargo, como cualquier químico, el cloro al hacer contacto con nuestro cuerpo puede repercutir en distintas alteraciones involucradas a la salud, como la irritación en los ojos, congestión nasal, dolor de garganta, entre otros síntomas que pueden desarrollarse al estar en contacto con este elemento.

Las albercas naturales o también llamadas biopiscinas, surgen de la necesidad de implementar sistemas de filtración y tratamiento natural para mantener una calidad de agua óptima, en donde se desarrollen las actividades de recreación, sin efectos por estar en contacto directo con el cloro, así como a los compuestos químicos clarificantes y de regulación de pH, entre otros, que son vertidos en el agua, previo a su uso.

El funcionamiento de una piscina natural consiste en depurar y limpiar el agua sin productos químicos. Existen tres zonas: la piscina principal o zona de nado, posteriormente el agua llega por gravedad a través de filtros que recogen grandes residuos de partículas a la zona de regeneración en donde se filtra a través de capas de sustrato, es aquí en donde las bacterias se descomponen y funcionan como nutrientes para el crecimiento de plantas. Una vez que el agua está purificada pasa a la zona de bombeo y vuelve a la zona de natación (Figura 1)

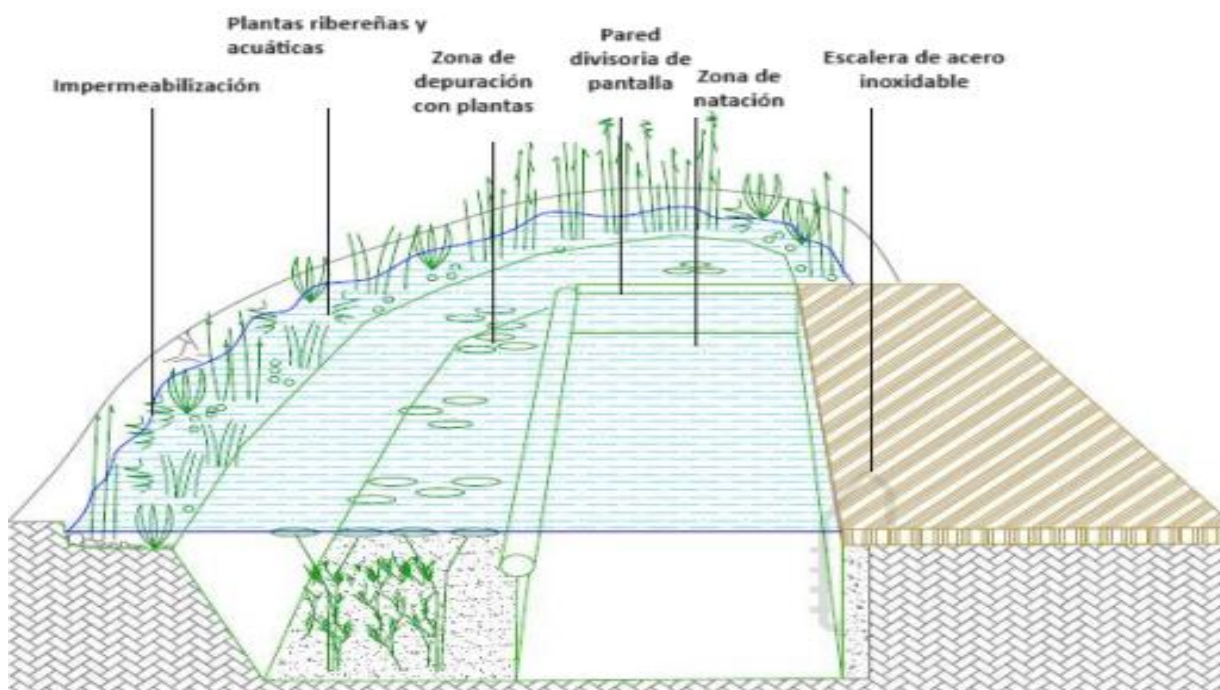


Figura 1. Esquema de una piscina biológica.

Fuente: Tomada de: "Alternativas sustentáveis: o caso das piscinas biológicas" por Gerald A., Schwarzer C., Schwarzer, U. 2017. – Esquema de uma piscina biológica. P. 82.

Aunque la investigación de albercas naturales se agrupa en poca bibliografía, en 2007 Charles Durrant, realizó una propuesta para la alberca olímpica de la Universidad de Sevilla, en donde el objetivo principal consistía en diseñar una piscina funcional y con bajos costos de financiamiento y operación. El diseño de la piscina natural contempla cuatro alturas, filtros de arena y dos unidades de ionización de cobre y plata para mantener una excelente calidad del agua en la piscina, la energía de los paneles solares fotovoltaicos se aprovecha para calentar el agua a unos 25°C. El costo total del diseño, incluido construcción, tuberías y mantenimiento, fue de aproximadamente \$890.600 dólares canadienses.

En 2013, se celebró en Río de Janeiro el IX Congreso Nacional de Excelencia en Gestión, en donde se proponen estos sistemas para mejorar el impacto ambiental y económico (Brotherhood, 2013). En junio del mismo año se realizó el evento del 7° Encontro de Educação Ambiental, Divulgação de práticas e partilha de experiências, en donde se hizo mención de alternativas sustentables: en el caso de las piscinas biológicas, explican que el funcionamiento de estas infraestructuras depende de la

purificación a través de vegetación en la que se realizan procesos biológicos de plantas acuáticas y de microorganismos asociados a ellas, estos sistemas son una imitación de ecosistemas naturales, por lo que excluye el uso de químicos utilizados en piscinas convencionales (Mafra et al., 2017).

De acuerdo con una publicación realizada en 2016, existen más de 20,000 infraestructuras privadas y públicas en Europa, más de 100 en Alemania y una en Canadá. La primera infraestructura con estas características en Norte América fue abierta en Minneapolis, Minnesota en julio de 2015 y otra más en Edmonton, Alberta en el 2016 (HCMA Architecture + Desing, 2016).

Durante este mismo año, el Profesor Dr. Wolfram Kircher, realizó una propuesta de 4 diseños para la construcción de Biopiscinas, analizando el movimiento del agua, la técnica de filtración, división y el tipo de construcción en la zona de baño. La filtración consiste en un sistema hidrobotánico, en donde se recuperan los principios del funcionamiento de un humedal, implementando capas de sustrato en donde el agua fluye lentamente, o en su caso un sistema de tuberías en donde se conduce el agua a un almacenamiento en donde se coloca un filtro de flujo rápido. En cuanto a las zonas de regeneración (filtración), propone tres diseños, el sistema Ein-Kammer (una cámara), zwei-Kammer-System (dos cámaras) y el Mehr-Kammer System (multicámara) (Kircher et al., 2016).

En cuanto a los principios constructivos para delimitar la zona de baño, está la opción de construirlo sin muros, o con la construcción de límites con muros bajos. Por otro lado, Quintero et al., (2017), evaluaron en laboratorio el uso de humedales verticales como sistema de fitorremediación obteniendo valores de calidad del agua por debajo de los límites permitidos. Más tarde, Karczmarczyk (2019), estudió la posibilidad del uso de tres filtros minerales paralelos para la eliminación de fosfato del agua en biopiscinas. En ese mismo año, Cedeño planteó el uso de humedales de flujo vertical obteniendo valores por debajo de los valores máximos permitidos en cuanto a calidad del agua (Ávila, 2022). Por último, se propusieron las biopiscinas como una alternativa a las piscinas cloradas para eliminar la necesidad de tratamiento químico y gastos en procesos mecánicos y eléctricos, minimizando los requisitos de bombeo, y disminuyendo los posibles efectos nocivos para la salud (Sánchez et al., 2020).

Aunque una alternativa con soluciones basadas en la naturaleza recurrente, viable y mayormente estudiada son los humedales artificiales, en los que se llevan a cabo procesos de fitorremediación a través de plantas ornamentales y pueden mejorar los índices de calidad del agua, son una ecotecnología que es poco conocida en cuanto

construcción y operación (Zitácuaro et al., 2022). Asimismo, en el caso del uso de Biopiscinas como sustitución en albercas cloradas, la información académica es escasa. Esta particularidad acarrea ciertos problemas a la hora de definir y ubicar el término biopiscina, por lo que supone una de las primeras cuestiones a resolver. Existen, por ejemplo, publicaciones del ámbito de la permacultura que abordan la cuestión, pero en su mayoría pertenecen a una difusión no académica. Otra cuestión notoria es que casi en su totalidad, dicha información se encuentra en idiomas diferentes al castellano (principalmente alemán e inglés) (Ávila, 2022).

Los humedales construidos representan una de las soluciones basadas en la naturaleza más viables y estudiadas; estos sistemas emplean la fitorremediación mediante plantas ornamentales para optimizar los índices de calidad del agua. Pese a sus ventajas, esta ecotecnología aún es poco conocida en términos de construcción y operación (Zitácuaro et al., 2022). Un escenario similar ocurre con las biopiscinas como alternativa a las albercas cloradas, cuya literatura académica es escasa, esta falta de documentación dificulta la delimitación teórica del término, convirtiéndose en uno de los primeros retos a resolver. Aunque existen publicaciones en el ámbito de la permacultura que abordan el tema, la mayoría pertenecen a la divulgación no indexada y se encuentran, casi en su totalidad, en idiomas distintos al castellano, principalmente alemán e inglés (Ávila, 2022).

Aunado a ello, las búsquedas en internet arrojan empresas dedicadas a la construcción de este tipo de infraestructuras, también debe aclararse que la mano de obra capacitada y especializada en este tipo de infraestructuras, así como el continuo mantenimiento requerido, dependen en gran medida de materiales impresos, fichas técnicas o manuales, que aún no se encuentran normalizados o reflejados en instrumentos regulatorios.

Sin duda las fuentes de inversión forman parte sustancial en la toma de decisiones que apuesten a la sustentabilidad hídrica, pues no debemos omitir que el compromiso y cuidado de un recurso tan valioso como lo es el agua, requiere de inversiones a corto, mediano y largo plazo, por lo que los planes administrativos, de gestión y logística de sitios de hospedaje, deberían incluir dentro de sus partidas la inversión necesaria para satisfacer sus propias demandas hídricas.

No obstante, ante estas premisas, se convierte en una estrategia con participación social, misma que al ser en localidades rurales y en conjunción con el sector académico pueden ser la opción para impulsar dichas alternativas.

Jalcomulco como territorio de oportunidad para implementar SbN

Como caso de estudio se presenta el municipio de Jalcomulco, uno de los destinos de turismo de aventura más representativos del estado de Veracruz. Geográficamente, se ubica entre los paralelos 19° 16' y 19° 24' de latitud norte, y los meridianos 96° 41' y 96° 50' de longitud oeste, a una altitud que oscila entre los 200 y 800 metros sobre el nivel del mar. El municipio se localiza a 41.4 km de la capital del estado (Xalapa), con un tiempo estimado de traslado de 51 minutos. Su extensión territorial es de 72.72 km², cifra que representa el 0.1% de la superficie estatal, y limita con los municipios de Emiliano Zapata, Apazapan, Tlaltetela y Coatepec (SIEGVER, 2020).

En el perímetro de la cabecera municipal, confluye El río La Antigua perteneciente a la región hidrológica administrativa X Golfo Centro del Papaloapan en el estado de Veracruz; limítrofe con la cuenca del Jamapa y otros RH28B. La longitud del río principal de la cuenca es de 148.47 Km y la longitud total de cauces es de 4,306 Km.

Jalcomulco se ha consolidado como un territorio clave para el desarrollo de investigaciones académicas, coordinadas en su gran mayoría por la Universidad Veracruzana e intervención de otras casas de estudio.

Desde 1999, diversas investigaciones han analizado el desarrollo turístico de Jalcomulco, Veracruz, destacando tanto sus beneficios como los retos que enfrenta. Uno de los primeros estudios, realizado por la Universidad Veracruzana, dio origen al Plan de Desarrollo Integral en Jalcomulco, el cual integró estrategias de ordenamiento territorial, turismo alternativo, manejo ambiental y organización comunitaria. Este proyecto sirvió como herramienta para la planeación municipal y la gestión de recursos públicos, identificando al turismo como una importante fuente de ingresos, aunque también evidenció problemas como la falta de organización comunitaria, el escaso compromiso con la conservación del patrimonio natural y cultural y la disminución de la actividad agrícola.

Posteriormente, en 2001 se impulsó el proyecto “El patrimonio ambiental como base para el turismo alternativo en Jalcomulco”, con el propósito de involucrar a campesinos y habitantes en la oferta de experiencias turísticas sustentables basadas en sus tradiciones, cultura y patrimonio ambiental (Universo, 2003). En 2004, un estudio de la Universidad del Sureste de California reveló que los estudiantes de la localidad percibían riesgos ambientales derivados del crecimiento del turismo. Además, mostró que una parte importante de los niños y niñas ya participaban en actividades relacionadas con el sector turístico, reflejando la creciente dependencia

económica de esta actividad y la preocupación por el incremento de la contaminación.

Más adelante, las investigaciones de Saldaña y colaboradores (2012 y 2018) analizaron la consolidación del turismo de aventura como modelo de negocio en Jalcomulco. Sus hallazgos indican que el crecimiento empresarial ocurrió con escasa regulación gubernamental, generando riesgos como el abandono de actividades tradicionales, problemas en la regularización de tierras ejidales y una fuerte dependencia del turismo de aventura. También destacan que el modelo organizacional se caracteriza por la estrecha interacción entre empresas y comunidad, donde las redes de colaboración y competencia conforman la base del desarrollo turístico.

Todo el territorio de Jalcomulco (72.72 km²), incumbe en la cuenca del río La Antigua, alberga dos corrientes de agua perennes Los Pescados y Santa María; y corrientes intermitentes de los ríos Cascajal, Hediondo, Moyuapan y Tenexapa (INEGI, 2010). Forma parte de la segmentación de la subcuenca identificada con la clave Ant24, que recibe únicamente agua superficial, lo que da lugar a identificarla como una zona receptora y de baja provisión de agua; el río Los Pescados tiene un orden de Horton-Strahler de 7, una superficie de 359.230 Km², 16.51 Km del río principal y representa el 3.34% del total del territorio de la cuenca (PAMIC, 2017).

Durante la administración Estatal (2004-2010), en la que se otorgaron concesiones a empresas internacionales para que en el territorio veracruzano se realizaran varios proyectos hidroeléctricos, fue suficiente para generar un movimiento social en defensa del río, a su vez emergieron un conjunto de organizaciones, principalmente el Colectivo de Pueblos Unidos de la Cuenca la Antigua por Ríos Libres (PUCARL), además de diversas organizaciones no gubernamentales como Asamblea Veracruzana de Iniciativas y Defensa Ambiental (LAVIDA), activistas del Grupo SENDAS, personal investigador de la Universidad Veracruzana, y del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), además de estudiantes con compromiso social, sin olvidar la contribución internacional de la Red Latinoamericana contra Represas y por los Ríos (REDLAR) y el Movimiento Mexicano de Afectados/as por las Presas y en Defensa de los Ríos (MAPDER), con el objeto de defender el cauce de infraestructuras impuestas.

Hoy en día, en temas ambientales, aún no se cuenta con infraestructuras que mejoren la calidad del río, si bien se tiene el registro de una planta de tratamiento con sistema de lagunas y con capacidad para 6 litros por segundo, ubicada a orillas de la localidad, considerada dentro del Inventario de Plantas Municipales de

Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en agosto del 2022 fue publicado, que la infraestructura fue clausurada por la Procuraduría de Medio Ambiente (PMA), dado que el sitio fue utilizado como un basurero a cielo abierto, por la administración antecesora, al no enviar la recolección de residuos sólidos urbanos al basurero de Emiliano Zapata (AVC noticias, 2022).

Aunque la población local es consciente en que se han descargado aguas residuales de manera directa al cuerpo de agua y no podemos ignorar que, al depender del turismo y por ende directamente del río, es evidente la necesidad de emplear estrategias para la gestión integral del recurso hídrico. Dentro del Plan Municipal de Desarrollo 2022 – 2025, se incluye el tratamiento de aguas residuales de la comunidad como una atención prioritaria, sin embargo, a la fecha no existe alguna propuesta a corto, mediano o largo plazo.

Puesto que la explotación del agua para fines recreativos puede generar una competencia a nivel local, entre habitantes, dueños de empresas ecoturísticas y turistas, desencadenando un problema social y de manera automática, un impacto ambiental, de no plantearse estos puntos el escenario a futuro puede ser devastador para una población como la de Jalcomulco, pues desde el 2004 a la fecha, los intentos por financiar proyectos con enfoque de manejo y gestión ambiental dentro del Municipio no se han consolidado. En este sentido, es dable afirmar que las empresas de turismo de aventura de Jalcomulco dependen del río, y en este sentido son, si se nos permite la expresión, ríos dependientes (juego de palabras construido a partir de la noción path dependence, bien conocida de los economistas evolutivos) (Saldaña et al., 2012).

A partir de lo anterior, el territorio de Jalcomulco ha demostrado ser un escenario idóneo para defender los recursos hídricos y al mismo tiempo promover el desarrollo turístico, reflejado en la construcción de diversos hoteles y centros ecoturísticos, que de acuerdo a la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN), el ecoturismo es aquella modalidad ambientalmente responsable orientada a visitar áreas naturales para apreciar su entorno y manifestaciones culturales, promoviendo la conservación, reduciendo el impacto de los visitantes y propiciando un beneficio socioeconómico activo para las comunidades locales (Drumm et al., 2005). En este sentido, se concluye que el territorio posee un potencial aún inexplorado para incorporar Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), fundamentales para optimizar la gestión del recurso hídrico del cual depende la región.

Metodología para la incorporación de SbN en el sector ecoturístico

Como parte de la metodología del proyecto de intervención, fue necesario entender las relaciones entre los distintos actores sociales que se desenvuelven en un determinado medio, en este caso en un sector ecoturístico que depende de recursos hídricos y prever posibles reacciones dentro de un sistema frente a acciones de intervención o bien cambios suscitados en algún aspecto de la estructura de la población bajo estudio, con la finalidad de definir problemas y potencialidades, profundizar en los mismos y establecer órdenes de importancia o prioridades, así como problemas que son causa de otros, con el objeto de identificar alternativas y decidir el camino para accionar, para ello se aplicó un diagnóstico participativo a informantes clave, que, por su trabajo, su rol en la comunidad o por su experiencia de vida, disponen de información y de una visión especial que permitió profundizar el conocimiento en el Manejo Integral de sus recursos hídricos.

En el sector educativo ambiental se implementaron talleres para alumnos de 4° y 6° semestre del Colegio de Bachilleres del Estado de Veracruz (COBAEV), en las experiencias educativas de Biología y Ecología respectivamente, con la gestión de las autoridades correspondientes.

Finalmente, pero no menos importante, se llevó a cabo una consulta bibliográfica sobre la relevancia que toma el consumo de agua en el sector turístico, basada en el método de caracterización de establecimientos hoteleros para la modelización de consumos de agua y también se recopiló bibliografía que permitiera definir y establecer las diferencias físicas entre centros ecoturísticos y hoteles para posteriormente realizar una caracterización de la infraestructura hotelera.

Para el análisis de la oferta turística en Jalcomulco se seleccionaron intencionalmente cuatro hoteles y cuatro centros ecoturísticos a partir de la Tabla 1 (Oferta hotelera en la localidad de Jalcomulco, Ver.). El inventario general permitió identificar un total de 25 establecimientos hospederos ubicados exclusivamente en la zona urbana. En su mayoría, estas infraestructuras presentan un diseño de espacios semiabiertos rodeados de áreas verdes y amenidades comunes que incluyen piscinas de agua clorada. Debido a que estas últimas representan las instalaciones con mayor demanda hídrica, el diagnóstico inicial reveló que algunos establecimientos operan con hasta cuatro albercas simultáneamente.

Tabla 1. Oferta hotelera en la localidad de Jalcomulco, Ver.

1	Aldea Jalcomulco	Sí	1	http://www.aldeajalcomulco.com.mx/
2	Aqua Ceiba	Sí	1	http://aquaceiba.com/
3	Campamento Río Salvaje	Sí	1	https://www.facebook.com/CampRioSalvaje
4	Cotlamani Hotel Aventura	Sí	1	https://cotlamani.com/areas-recreativas/
5	El Divisadero	Sí	3	https://www.facebook.com/El-Divisadero-116149363741/photos/?ref=page_internal
6	Expediciones México Verde	Sí	1	https://www.mexicoverde.com/
7	Hostal Amigos del Río Expediciones	Sí	2	https://amigos-del-rios-expediciones.ueniweb.com/#amenities
8	Hotel Anthurium	Sí	1	https://hotel-anthurium.negocio.site/?utm_source=google&utm_medium=referral
9	Hotel La Villa Jalcomulco	Sí	2	https://www.facebook.com/jalcomulco.hotel.lavilla
10	Hotel Posada Milán	No	-	-
11	Hotel Sommeil	Sí	1	http://sommeil.mx/principalPortal/sommeil/index.html
12	La Antihua	Sí	4	https://www.viajesdeaventura.com.mx/
13	Los Alcatraces	Sí	2	https://www.facebook.com/Hotel-Los-Alcatraces-159552507412017/
14	Los Arcos	Sí	1	https://hotel-los-arcos-jalcomulco.booked.mx/
15	No Manches W.	Sí	1	https://www.google.com/maps/place/No+Manches+Wey/@19.3309392,-96.7585041,19z/data=!4m13!1m7!3m6!1s0x85c4b61c76ec26db:0x935fd56e5813167b!2s94000+Jalcomulco,+Ver.!3b1!8m2!3s

				d19.3318853!4d-96.762322!3m4!1s0x0:0xb5a8966cb2cd1c2!8m2!3d19.3307873!4d-96.7575305
16	Nuhú Nature Hotel	Sí	1	https://www.facebook.com/nuhunaturalhotel/photos/?ref=page_internal
17	Oasis	Sí	2	https://www.facebook.com/Albercas-Oasis-601954803611819/?ref=page_internal
18	Okavango	Sí	1	https://okavango.hotelesdeveracruzMexico.com/es/#map
19	Picocanoa Rodavento	Sí	2	https://www.picocanoarodavento.com/
20	Posada Balam	Sí	1	https://www.facebook.com/posada.balam/
21	Posada del Río	Sí	1	https://www.facebook.com/PosadaDelRioJalcomulco/
22	Quinto Sol Hotel Boutique & Expediciones	Sí	1	http://www.quintosolexpediciones.com/jalcomulco
23	Río Aventura	Sí	2	https://www.rioaventura.com.mx
24	Sendero Extremo	Sí	1	https://www.facebook.com/senderoextremojalco/
25	Yolotl	Sí	2	https://www.facebook.com/Yolotlcampamento/
Total=			36	

Fuente: Elaboración propia como resultado de consulta en buscador WEB.

Posteriormente se diseñó una base de datos que recopiló información cualitativa y cuantitativa de estos sitios, con la colaboración de dueños, gerentes y encargados de distintas áreas de los alojamientos. La información recopilada refiere a la oferta y demanda del alojamiento durante el año 2022, la cantidad de muebles hidrosanitarios y la existencia de tinacos o cisternas para reservorios de agua; asimismo, se tomaron mediciones de las albercas encontradas en los sitios turísticos, con el interés de conocer la cantidad de agua que requieren para su llenado.

Posteriormente se establecieron tres pasos fundamentales, para modelar el consumo de los ocho destinos turísticos, tomando como referente el estudio llamado Consumo de Agua en Establecimientos Hoteleros de México, por Santacruz De León et al., (2020), en donde se proponen los siguientes puntos:

1. El primer paso para la modelización del consumo de una cadena es la segmentación de sus hoteles en grupos similares según su consumo típico (Escalera et al., 2014). Por lo que los datos arrojados corresponden con el contenido de la Tabla 2: Caracterización de hoteles y centros ecoturísticos en Jalcomulco, Ver.

Tabla 2. Caracterización de hoteles y centros ecoturísticos en Jalcomulco, Ver.

Tipo (C.E./ Hotel)	C.E. 1	C.E. 2	C.E. 3	C.E. 4	Hotel 1	Hotel 2	Hotel 3	Hotel 4
Tipo de edificación	Hori-zontal	Vertical	Hori-zontal	Hori-zontal	Hori-zontal	Verti-cal	Hori-zontal	Hori-zontal
Número de habitaciones	6	6	71	34	5	7	8	13
Capacidad total	30	26	272	112	30	20	30	40
Total de piscinas	1	3	1	1	1	1	1	1
Áreas Verdes	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No
Materiales	Madera	Bambú, madera, bahareque, lona	Made-ra, muros de adobe, bambú	Adobe palma, lona	Madera, bambú, muros de mampostería	Concre-to y muros de mam-poste-ría	Concre-to y muros de mam-poste-ría	Concreto y muros de mampostería
Luz Solar	No	Sí	No	No	No	No	No	No
Fosa séptica	No	No	No	Sí	Sí	No	No	No
Biodigestor	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	No

Tipo (C.E./ Hotel)	C.E. 1	C.E. 2	C.E. 3	C.E. 4	Hotel 1	Hotel 2	Hotel 3	Hotel 4
Ecotecnias para el cuidado del agua								
Captación pluvial	No	Sí	No	No	No	No	No	No
Baños secos	No	No	No	No	No	No	No	No
Biofiltros	No	No	No	No	No	No	No	No
Humedales de Tratamiento	No	No	No	No	No	No	No	No
Tratamiento Químico	No	No	Sí	No	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.

2. El segundo paso consistió en detectar el consumo de agua para un huésped. Para ello se desarrolló un instrumento que permitió recabar los consumos de agua por usuario, para lavado y en almacenamiento, asimismo se estimó la demanda de agua necesaria para uso en las actividades cotidianas que realiza el huésped en un alojamiento; se incluyó el consumo que demanda el alojamiento para el lavado de trastes, toallas, sábanas, fundas, manteles, etc; considerando a estos últimos con un consumo de agua de litros por carga; por último, se recopiló información del volumen de agua almacenado en tinacos y cisternas existentes en los destinos turísticos. Para el consumo de tinas, lavadoras y tinacos se optó por revisar fichas técnicas en las que se especifica el volumen requerido para lavadoras industriales y convencionales. En el caso del consumo de agua para el lavado de trastes, se tomó en cuenta la información generada por la USGS (The United States Geological Survey), dentro del apartado How much water do I use at home each day.
3. El tercer paso consistió en calcular un estimado de consumo de agua derivado de la infraestructura hidráulica de cada hotel o centro ecoturístico, incluyendo el volumen de agua que requiere el llenado de las albercas. Finalmente, los resultados se graficaron.

Una vez teniendo referentes bibliográficos y datos cualitativos y cuantitativos de la base de datos mencionada anteriormente, se generó información integral que permitió sensibilizar y conocer el consumo del agua en los centros ecoturísticos y hoteles, específicamente el consumo de agua para el llenado de albercas, en una etapa posterior se realizó un recorrido a los ocho sitios turísticos visitados con anterioridad, para dar retroalimentación de la información recopilada, se propuso a los dueños y encargados la opción de invertir en la construcción de una biopiscina, por lo que se les invitó a una charla enfocada en las soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de la calidad del agua en albercas, misma que fue realizada en el salón de usos múltiples de la casa ejidal.

A este llamado asistió únicamente el gerente del Centro Ecoturístico La Aldea con posibilidades de realizar una inversión, después de conocer a detalle los componentes, funcionamiento y ventajas de las biopiscinas, se formalizó una visita en las instalaciones para hacer un reconocimiento del sitio y poder elegir la mejor ubicación para la construcción de la biopiscina. Una vez definido el sitio se realizó un levantamiento topográfico, para obtener la representación del terreno, se procesó la información obtenida del terreno en programas para dibujo asistido por computadora (AutoCAD y CivilCAD).

Se trabajaron dos propuestas técnicas económicas y se expusieron ante los inversionistas del centro ecoturístico, posteriormente, se realizó el proceso constructivo con los materiales necesarios, mismo que fue documentado y se puso en operación al público, para ello fue necesario diseñar una infografía con el reglamento para su uso, también se elaboró una infografía que explica brevemente la definición de las biopiscinas y sus principales elementos. Como parte complementaria se trabajó en la elaboración de un manual de mantenimiento para la biopiscina, que se muestra como resultado de esta investigación, asimismo, se realizó una capacitación de este para el personal operativo de La Aldea.

Resultados

Entre las generalidades detectadas de la aplicación del diagnóstico, resaltó que en cuanto al uso que se le da al agua, existe una falta de conciencia en el cuidado del recurso, dado que existen algunas viviendas en donde no hay válvulas flotadoras que regulen el llenado de tanques o tinacos, por lo que el agua se desperdicia constantemente, en ámbitos socioambientales los entrevistados coincidieron en que la falta de gestión hídrica depende de la nula sanción para quienes hacen un uso

desmedido y poco regulado acompañado de la inexistente remuneración económica del servicio de agua potable.

La población es consciente de que el río cada vez se degrade en términos de calidad gracias a la contaminación humana, sin embargo, manifestaron que no sólo es responsabilidad de la comunidad, sino de toda la cuenca, sobre todo los sitios en dónde hay ingenios de café, azúcar o industria refresquera, pues todos sus desechos finalmente aportan aguas contaminadas al río, además, toda la red de drenaje de la localidad de Jalcomulco desemboca aproximadamente a 1 km aguas abajo, por lo que el deterioro sigue incrementándose, en todo su trayecto, asimismo, son conocedores de que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, no está logrando su objetivo y no existe un proyecto a corto plazo para su rehabilitación y operación, pues se requiere de una gran inversión, sin embargo, la población en su mayoría considera que este tipo de tratamientos son necesarios y obligatorios para evitar la contaminación aguas abajo.

En cuanto a los talleres de educación ambiental impartidos con la población estudiantil de nivel medio superior del Colegio de Bachilleres del Estado de Veracruz (COBAEV), plantel 48 EMSAD celebrados los días 21 y 28 de abril del 2023, se impartieron charlas con el objeto de sensibilizar el cuidado de los recursos hídricos, se registró la asistencia de 42 estudiantes, dos de los grupos fueron de cuarto semestre relacionados con la materia de Biología y un grupo de sexto semestre que cursó la materia de Ecología, ambas impartidas por el Ing. Agrónomo José Eduardo Tepetla Quiroz.



Figura 2. Presentación del taller de Educación Ambiental en el plantel COBAEV 48 EMSAD. Fuente: Fotografía de autoría propia.

Los principales temas que se abordaron fueron los siguientes:

1. ¿Qué es la Educación Ambiental?
2. Desde Siempre y en todos lados ¡agua!
3. Disponibilidad y Distribución del Agua en el Mundo
4. El Ciclo del Agua
5. El agua que no ves
6. Ecotecnias para el Cuidado del Agua
7. Soluciones basadas en la Naturaleza
8. Humedales Construidos
9. Biopiscinas como infraestructura sostenible para el cuidado del agua en centros ecoturísticos.
10. Proyección del Cortometraje “La Abuela Grillo”

En el proceso de sensibilización para el cuidado del agua se mencionó el poco porcentaje de agua para consumo humano que hay en el planeta, esto mostró cierta preocupación en los asistentes, pues es común que escuchen que la mayor superficie del planeta está cubierta por agua, pero no toda es para consumo humano. Otra actividad y la más impactante para los alumnos consistió en calcular el agua virtual que es necesaria para desarrollar todas sus actividades en un día, para ello se conformaron en equipos, eligieron la rutina de un compañero, tomaron como base la información que les fue expuesta para saber cuántos litros se necesitan para una taza de café, tortillas, para su vestimenta, etc.

Al final un miembro del equipo expuso la rutina y posteriormente reflexionaron sobre el tema, el mayor consumo de agua en una rutina del día arrojó más de 45 mil litros de agua virtual.

Cabe mencionar que, para fomentar el aprendizaje en los alumnos en el tema de ecotecnias para el cuidado del agua, hubo participación de algunos de ellos, o cual permitió identificar que las ecotecnias más comunes en su contexto son los baños secos y la captación pluvial, incluso algunos de ellos mencionaron la implementación de estas prácticas en sus casas; el hilo conductor del taller permitió relacionar a las biopiscinas como una ecotecnia, pero también se les relacionó con el tema de soluciones basadas en la naturaleza y se relacionó el tratamiento de aguas negras con humedales construidos, destacando que estos temas fueron completamente nuevos para ellos.

Como actividad de cierre de los talleres, se proyectó el cortometraje “La Abuela Grillo”, el cual aborda la privatización del agua y los conflictos socioambientales que

enfrentan las comunidades afectadas. Al concluir, los alumnos realizaron una reflexión colectiva y vincularon la trama con la defensa de los ríos libres en su propio entorno. A pesar de su juventud, demostraron un sólido conocimiento sobre la historia de unión comunitaria en la cuenca de Jalcomulco. En sus intervenciones, los estudiantes destacaron cómo el control del recurso hídrico se concentra en pocas manos, lo que detona la privatización, la competencia y el uso desmedido por la falta de cultura ambiental. Finalmente, manifestaron un fuerte sentido de identidad al reivindicar la lucha histórica por la protección de su río.

Implementación de SbN en el sector ecoturístico de Jalcomulco

De acuerdo a la caracterización del centro Ecoturístico de La Aldea, este se conforma por habitaciones tipo cabañas, cuentan con un salón multiusos, una estufa, una alberca, un área social para comedor y una amplia extensión de área verde, lo cual permitió situar el espacio idóneo para la construcción de la biopiscina, entre otros factores, se optó por analizar la trayectoria del sol en zonas que permitieran la incidencia de los rayos UV fundamentales en el tratamiento patológico en las biopiscinas; también se realizó un reconocimiento del terreno en términos de curvas de nivel y para delimitar áreas en donde existe arbolado o elementos que sean inamovibles y para proponer una infraestructura adaptada al terreno.

En cuanto a la aplicación de SbN, se diseñó una biopiscina de 6 x 6 metros, en donde se aloja, la sección de plantas emergentes, plantas flotantes y el vaso de nado. El funcionamiento de esta biopiscina radica en aplicar procesos naturales para llevar a cabo una filtración biológica, la conservación de biodiversidad se logra con una selección vegetal acuática, capaz de adaptarse a los parámetros climáticos de la zona. Para lograr estas premisas y criterios de SbN se optó por un sistema constructivo, que partió de un muro perimetral de piedra que va desde el metro de profundidad hasta 1.80 m, cabe mencionar que en todo momento se respetó la topografía del sitio, con el objeto de eficientizar recursos materiales, por ende, su construcción fue realizada con piedra del suelo representativo del lugar.

En cuanto a los componentes para dar vida a la biopiscina se contemplaron materiales como la geomembrana EPDM Firestone y el geotextil de 200 g/m², estos elementos fungieron como capa impermeable; asimismo, se utilizaron vigas de madera de pino unidas por taquetes de madera para delimitar el vaso de nado; para la siembra de la vegetación se colocaron distintos sustratos como zeolita, filtro de grava y tierra negra, resalto que esta fase es importante, pues de ello dependen los intercambios bioquímicos para que la vegetación plantada pueda alimentarse de

nutrientes encontrados en el agua y se evite el uso de químicos. Esta paleta vegetal se encuentra en el manual de mantenimiento de la biopiscina.

Para recibir el área de plantación, se extendió una capa de geotextil; enseguida se colocó un sustrato, el cual resultó de la combinación entre tierra negra del sitio y zeolita granulada, que es un mineral producto de rocas sedimentarias. Este material es utilizado en sistemas para el tratamiento de la calidad del agua. Al ser altamente hidrofílica, facilita la absorción de nutrientes por las plantas, ya que éstos son tomados por las raíces disueltos en agua (Chica Toro et al., 2006).

Una vez sembrada la vegetación se comenzó con el llenado de la biopiscina; adicionalmente se colocaron piedras sobre el área para fijar raíces y formar parte de elementos de ornato. Una vez llenada se dio paso a la etapa de estabilización del ecosistema.

Uso y estabilización de la biopiscina

La fase de estabilización de la infraestructura comprendió del día 6 de noviembre al 18 de diciembre del 2023, durante estas 6 semanas no se utilizó para fines recreativos, con el objetivo de permitir que el ecosistema se adaptara y comenzara el proceso de reproducción de las plantas, en el caso de los nenúfares, el crecimiento de los peciolos comenzó a partir de la segunda semana, así como la reproducción de sus hojas, para la primavera del 2024, se tuvo registro de la floración.

Entre los insectos que predominan en el ecosistema, se observaron libélulas en fase larvaria y en fase adulta. Asimismo, se observaron caracoles, catarinas y abejas. Durante esta fase, también se monitoreó la turbiedad del agua para descartar eutrofización y colapso en el ecosistema, del cual no se tuvo un caso representativo.

De manera adicional, se fabricaron jardineras con materiales sobrantes (madera y geotextil), para mejorar el paisajismo, además de colocar plantación ornamental, se tuvo a bien dejar espacios que recibieran la hojarasca contenida en el fondo, así como la materia orgánica producto de la poda de las plantas encargadas de llevar a cabo la fitorremediación. Para el uso de huéspedes se construyó un corredor de madera para transitar por la zona de nado y se colocaron barandales de bambú para brindar mayor seguridad.

Como fase emergente en la implementación de esta alberca natural, se elaboró un reglamento de uso que enfatiza la prohibición de invadir la zona de regeneración vegetal y de realizar clavados. Asimismo, se instaló un cartel informativo en el área

de esparcimiento con el fin de difundir los alcances del proyecto integrador entre los visitantes.

Finalmente, cabe destacar que desde mayo de 2024 la biopiscina se promueve activamente en las redes sociales del centro ecoturístico, consolidándose como un elemento identitario del sitio. Además de ofrecer experiencias recreativas en un entorno natural, esta infraestructura —única en el municipio y la región— funciona como un escenario permanente de educación ambiental para la conservación y gestión del agua. De este modo, se constituye como un punto de partida para la investigación científica, la incubación de proyectos análogos y la potenciación del ecoturismo con responsabilidad socioambiental.

Manual de Mantenimiento para la biopiscina del Centro Ecoturístico La Aldea Jalcomulco

Dentro de las SbN podemos encontrar otras terminologías que indican los funcionamientos específicos y tecnocráticos de la infraestructura verde, por ejemplo:

Ecohidrología: ciencia integradora que se centra en la interacción entre la hidrología y la biota. Busca reforzar los servicios ecosistémicos en los paisajes modificados para reducir los impactos antropogénicos. Los enfoques holísticos que manejan la hidrología y la biota pretenden lograr la sostenibilidad tanto en los ecosistemas como en las poblaciones humanas y mejorar la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH). Al mismo tiempo, la ecohidrología enfatiza la importancia de las medidas ecotecnológicas como un componente integral de la gestión del agua, complementando los enfoques de ingeniería estándar (Zalewski, 2002). Además, Mitsch y Jørgensen (2004) desarrollaron la aplicación de ingeniería ecológica, p. ej. la gestión de los humedales para depurar el agua de las excesivas cargas de nutrientes basada en la teoría ecológica y modelos matemáticos (UNESCO, 2018).

Fitorremediación: representa una alternativa sustentable y de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos. A través de procesos bioquímicos reduce la concentración de diversos compuestos, con la intervención de plantas y microorganismos, cuya tarea principal es remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Delgadillo et al., 2011).

Ingeniería ecológica: se refiere al diseño de ecosistemas sostenibles que integren a la sociedad humana con su ambiente natural para beneficio de ambos. Sus principales objetivos son la restauración de ecosistemas afectados sustancialmente por

actividades humanas y el desarrollo de nuevos ecosistemas sostenibles que tengan valor humano y ecológico (Mitsch, 2012).

Ubicación de las zonas de plantación

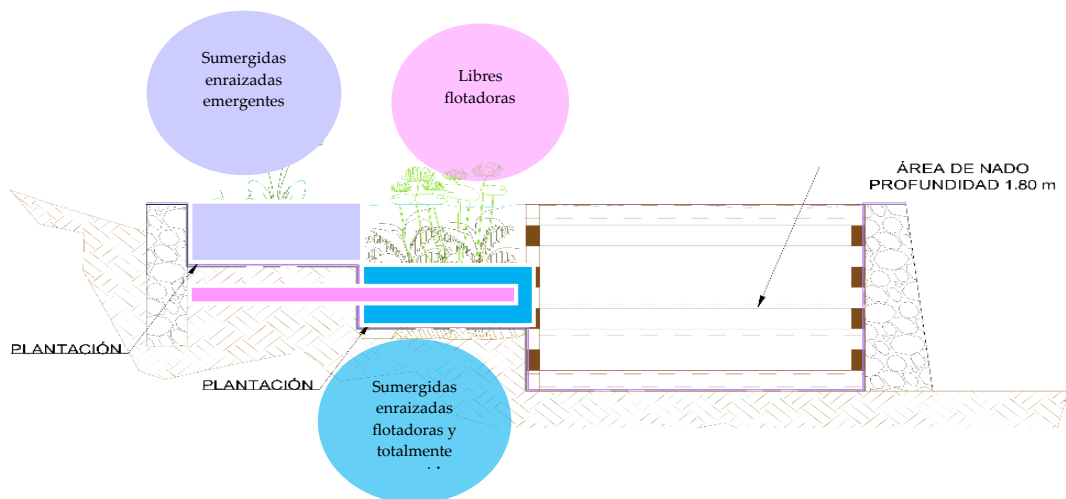


Figura 3. Ubicación de zonas de plantación. Elaboración propia. 2023.

Mantenimiento por zona de plantación

Tabla 3. Paleta vegetal

Planta	Nombre	Mantenimiento
1.1 Sumergidas enraizadas emergentes.		
	<i>Schoenoplectus americanus</i> Junco	Realizar una poda de acuerdo con su crecimiento. En caso de presentar tallos secos, se deberán cortar y extraer de la biopiscina para evitar su descomposición dentro del agua.

Planta	Nombre	Mantenimiento
	<i>Cyperus papyrus</i> Papiro	Realizar una poda de acuerdo con su crecimiento. En caso de presentar tallos debilitados se puede utilizar una horqueta para brindar soporte y evitar su caída dentro de la biopiscina.
	<i>Colocasia esculenta</i> , var. "Black Magic" Magia Negra	Se deberá controlar el crecimiento de sus hojas, en caso de encontrar hojas nuevas, se deberán podar y retirar las que se encuentren deterioradas, para evitar su caída y descomposición dentro de la biopiscina.

1.2 Sumergidas enraizadas emergentes comestibles

	<i>Colocasia esculenta</i> Malanga	Se deberá controlar el crecimiento de sus hojas, en caso de encontrar hojas nuevas, se deberán podar y retirar las que se encuentren deterioradas, para evitar su caída y descomposición dentro de la biopiscina.
--	---	---

1.3 Sumergidas enraizadas flotadoras y totalmente sumergidas.

	<i>Potamogeton coloratus</i> Potamogeton	Una vez que hayan alcanzado longitudes superiores a un metro de longitud o en caso se extenderse al área del vaso de nado, se requiere de una poda. Durante su crecimiento es posible la aparición de alga, misma que deberá retirarse.
---	---	---

Planta	Nombre	Mantenimiento
	<i>Nymphaea colorata</i>	Una vez que hayan alcanzado longitudes superiores a un metro de longitud o en caso se extenderse al área del vaso de nado, se requiere de una poda. Durante la reproducción de sus hojas se desprenderán por lo que es necesario retirarlas de la biopiscina.
	Nenúfar	

1.4 Libres Flotadoras

	<i>Salvinia minima</i>	Se deberán retirar aquellas hojas que se tornen en color café, asimismo se recomienda controlar su reproducción para ayudar a que los rayos del sol lleguen al fondo de la zona de plantación para evitar la eutrofización.
	Lenteja de agua	
	<i>Pistia stratiotes</i>	Se deberán retirar aquellas hojas que se tornen en color café, asimismo se recomienda controlar su reproducción para ayudar a que los rayos del sol lleguen al fondo de la zona de plantación para evitar la eutrofización.
	Lechuga de Agua	

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.

Tabla 4. Recomendaciones generales para zonas de plantación.

- 1.- No extraer la vegetación viva.
- 2.- En caso de realizar una plantación, para hacer nuevamente uso de la biopiscina, se deberán esperar 24 horas de estabilización y posteriormente se deberá aspirar el vaso de nado.
- 3.- La gama vegetal no podrá ser sustituida sin previa consulta de profesionales en el tema.
- 4.- Se podrá reproducir para otros espacios la plantación emergente. La plantación sumergida no.
- 5.- En caso de detectar orugas en las hojas, se deberán extraer.
- 6.- En caso de existir alguna plaga en hojas deberán ser limpiadas con paño húmedo o red. Nunca con uso de insecticidas.
- 7.- Para el retiro de materia orgánica al interior de la zona de plantación sólo puede ingresar una persona.

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.

Ubicación del vaso de nado

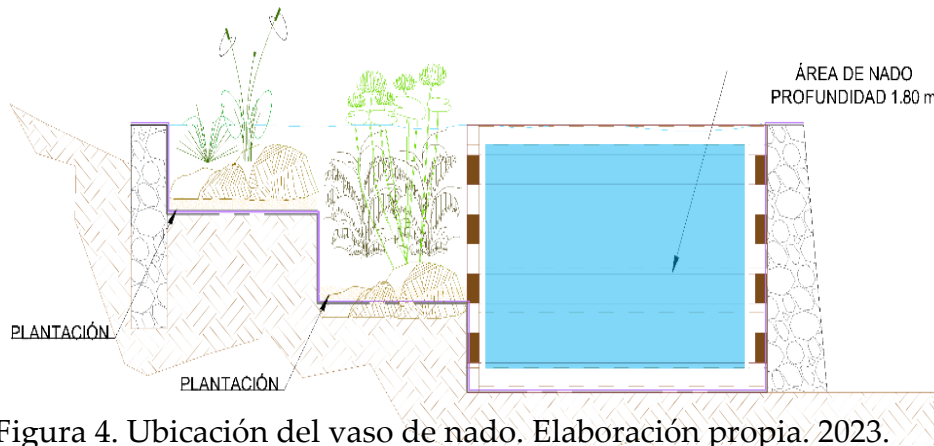


Figura 4. Ubicación del vaso de nado. Elaboración propia. 2023.

Mantenimiento para la zona del vaso de nado

Tabla 5. Mantenimiento

-
- 1.- Se deberán retirar las hojas o vegetación desprendida que se haya ido al fondo, así como algas o algún otro elemento que no forme parte del ecosistema, esta actividad también deberá realizarse en la zona de plantación.
 - 2.- En caso de encontrar insectos ahogados, se deberán retirar de la biopiscina.
 - 3.- En ningún momento se podrán introducir peces u otros anfibios.
 - 4.- La bomba de aire deberá funcionar 24 horas en días calurosos.
 - 5.- La temperatura del agua deberá permanecer mínimo a 28°C.
 - 6.- En ningún momento la piscina deberá estar vacía. Pues las plantas requieren del agua para realizar procesos bioquímicos.
 - 7.- Derivado de la evaporación del agua en temporada de calor, se deberá rellenar la biopiscina hasta el nivel de agua sugerido.
 - 8.- En el caso de lluvias que aumenten el nivel de agua sugerido. Se deberá realizar un vaciado del líquido hasta alcanzar el nivel de agua sugerido.
-

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.

Tabla 6. Limpieza

-
- 1.- Se recomienda aspirar el vaso de nado una vez por semana.
-
- 2.- En caso de presentarse lama en la madera se deberá cepillar y posteriormente aspirar.
-
- 3.- Se recomienda utilizar un biofiltro de limpieza para el agua al menos una vez al mes.
-
- 4.- En caso de existir algún derrame de líquidos que contamine el ecosistema, se deberá sustituir el agua de toda la infraestructura en el momento y esperar nuevamente de 4 a 6 semanas de estabilización para poder ingresar.
-

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.

Mantenimiento de la infraestructura

Tabla 7. Recomendaciones generales

- 1.- Es importante contar con la opinión de un técnico para realizar mantenimiento a la estructura en la compostura o modificación de los componentes de la biopiscina.
- 2.- Para el vaciado de la biopiscina, es necesario contar con tinajas que reciban a la vegetación plantada para su conservación.
- 3.- La manipulación de la vegetación y sustrato deberá ser manual. Sin arrancar las raíces.
- 4.- Se deberán retirar los elementos en el sentido opuesto a como fueron colocados. (Agua, vegetación, sustratos y piedras ornamentales, geotextil, madera, geomembrana, geotextil).
- 5.- En caso de realizar alguna rehabilitación de la infraestructura, para hacer nuevamente uso de la biopiscina deberán transcurrir de 4 a 6 semanas de estabilización y posteriormente se deberá aspirar el vaso de nado.
- 6.- Para prolongar la vida útil de la madera sumergida se recomienda mantener el nivel de agua sugerido por el responsable técnico.

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.



Figura 5. Vista general de la biopiscina. Fuente: Fotografía de autoría propia.

Contribución de la biopiscina a los criterios internacionales de las Soluciones basadas en la Naturaleza

La implementación de la biopiscina en el Centro Ecoturístico La Aldea permitió materializar los principios promovidos por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y las Naciones Unidas para las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Más allá de su función recreativa, esta infraestructura integra procesos ecológicos que contribuyen a la gestión sostenible del agua, al tiempo que genera beneficios ambientales, sociales y económicos. Su diseño se fundamenta en la utilización de vegetación acuática, sustratos minerales y comunidades microbianas que actúan de manera similar a los procesos observados en humedales naturales, favoreciendo la depuración biológica del agua y reduciendo la necesidad de tratamientos convencionales.

Asimismo, la biopiscina responde a un desafío social relacionado con el elevado consumo de agua y el uso de productos químicos en instalaciones turísticas. De manera complementaria, genera múltiples beneficios asociados a la conservación de la biodiversidad, la educación ambiental, la mejora paisajística y la diversificación de la oferta ecoturística. La Tabla 8 resume la correspondencia entre los principales criterios internacionales de las SbN y las evidencias observadas durante la implementación de esta experiencia en Jalcomulco.

Tabla 8. Criterios de SbN aplicados en la biopiscina.

Criterio de SbN	Evidencia en la biopiscina
Utiliza procesos naturales	Filtración y depuración biológica mediante vegetación acuática, microorganismos y sustratos minerales
Atiende un desafío social	Disminuye la dependencia de tratamientos convencionales y promueve una gestión más sostenible del agua en el sector turístico
Genera beneficios múltiples	Integra funciones recreativas, paisajísticas, educativas y ambientales en una sola infraestructura.
Favorece la biodiversidad	Incorpora vegetación acuática y crea microhábitats para insectos, polinizadores y otros organismos asociados
Promueve la resiliencia	Reduce el uso de productos químicos y fortalece la capacidad adaptativa de la infraestructura ante escenarios de escasez o deterioro ambiental.

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis de investigación.

En conjunto, estos resultados demuestran que las biopiscinas pueden considerarse una alternativa viable de infraestructura verde para el sector ecoturístico, al combinar la conservación de procesos ecológicos con la satisfacción de necesidades humanas. La experiencia desarrollada en Jalcomulco aporta evidencia práctica sobre el potencial de las SbN para contribuir a la gestión integral del agua y fortalecer la sostenibilidad de destinos turísticos dependientes de los recursos naturales.

Conclusiones

Ante la crisis global del agua y su impacto directo en la salud humana y los ecosistemas, este trabajo generó información estratégica y transversal orientada al diseño de acciones colectivas para el cuidado del recurso hídrico en la localidad de Jalcomulco, Veracruz. A través de un enfoque metodológico participativo se logró la vinculación de diversos actores sociales para la futura materialización de proyectos integrales de gestión hídrica. En el sector académico se reactivó la vinculación comunitaria con el COBAEV, un hecho inédito desde el año 2004. La participación del alumnado demostró un alto interés y receptividad hacia las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y la infraestructura verde. La incorporación de estos conceptos y terminología en su formación técnica no solo refuerza la gestión colectiva del agua, sino que capacita a los jóvenes para diagnosticar deficiencias y activar las potencialidades ambientales de su propia comunidad.

Por otra parte, el estudio demostró los beneficios colaterales de los enfoques ecosistémicos en el sector privado. La caracterización de cuatro hoteles y cuatro centros ecoturísticos visibilizó una nula previsión de inversión económica destinada a la gestión hídrica dentro de sus partidas financieras. El diagnóstico reveló que el llenado de albercas constituye el mayor volumen de consumo de agua, por lo que las biopiscinas emergen como una alternativa técnica y financieramente viable. Gracias a la inversión y co-participación del Centro Ecoturístico La Aldea, se logró validar la innovación de estas tecnologías mediante el tratamiento biológico de un volumen de 35.10 m³ (35,000 litros) de agua, eliminando por completo la necesidad de aditivos químicos tradicionales.

El análisis de costos comparativos demostró que, aunque la inversión inicial en infraestructura verde puede equipararse a los sistemas convencionales, el ahorro a largo plazo en mantenimiento, energía y suministro químico justifica su viabilidad comercial. Asimismo, la implementación de esta infraestructura generó múltiples

servicios ecosistémicos, tales como la regulación microclimática, el soporte a la biodiversidad local y la purificación natural del recurso. Estos procesos biológicos aportaron significativos beneficios paisajísticos, integrando la infraestructura de manera estética y armónica con el entorno natural de Jalcomulco. Esta transformación no solo mejoró el atractivo visual del establecimiento, sino que se tradujo en una excelente aceptación por parte de los usuarios, quienes manifestaron una percepción positiva hacia las ecotecnias y valoraron la experiencia de un baño en agua libre de químicos. Finalmente, la difusión continua de este proyecto es crucial para consolidar la adopción futura de estas soluciones a largo plazo. Este estudio aporta una base conceptual y empírica real que servirá como herramienta explicativa para entidades académicas, el sector empresarial turístico y las instituciones municipales. Asimismo, cumple con el objetivo de fundamentar futuras investigaciones que evalúen la implementación de albercas naturales, profundicen en sus mejoras técnicas y promuevan su adopción en los ámbitos académico, legislativo y comercial.

Más allá de constituir una infraestructura recreativa innovadora, la biopiscina demostró ser una Solución basada en la Naturaleza funcionalmente equivalente a un sistema de humedal artificial para la gestión sostenible del agua. Su capacidad para integrar procesos ecológicos, reducir el uso de insumos químicos y generar beneficios ambientales y sociales simultáneos evidencia el potencial de este tipo de intervenciones para contribuir a la transición hacia modelos turísticos más resilientes y sostenibles. La experiencia desarrollada en Jalcomulco aporta evidencia práctica sobre la aplicabilidad de las SbN en contextos ecoturísticos y abre oportunidades para su réplica en otros territorios con características similares.

Referencias

- Ávila Víctor. (2022). *Biopiscinas una alternativa sostenible. Grado en Arquitectura Técnica. Escuela Politécnica Superior*. Universidad de Alicante.
- Brotherhood, M. E. (2013). *A viabilidade da implantação de piscinas biológicas no Brasil*. IX Congreso Nacional de Excelencia Em Gestão. Rio de Janeiro.
- Chica Toro, F. D., Londoño Benítez, L. M., & Álvarez Herrera, M. I. (2006). La zeolita en la mitigación ambiental. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 30-34.
- Comisión Nacional del Agua. (2022). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-8-23.pdf>.
- CONAGUA. (2020). *Usos del Agua en México 2020*. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/UsosAgua/>.
- Cooper, C., Finzi, J., Hasbrouck, J., & Todd V. (2004). *A case study of sustainability: Jalcomulco, Veracruz*. Center for Sustainable Cities University of Southern California Los Angeles.
- Cotler Ávalos, H., Galindo Alcántar, A., González Mora, I. D., Pineda López, R. F. y Ríos Patrón, E. (2013). *Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable / Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612.
- Drumm, Andy., Moore, Alan. (2005). *Un manual para los profesionales de la conservación*. Volumen 1. Arlington, Virginia, USA: The Nature Conservancy.
- Durrant, C., Correia, E., Golding, G., & Bola, S. (2007). *Natural Swimming Pool Design*. En W. D. Medhat Moussa, *Proceedings of the ENGG 3100: Design III Projects*, 2007. 81-82. Guelph: University of Guelph.
- Escalera Izquierdo, G., Pérez Zabaleta, A., & Vizcaino Pérez, L. V. (2014). Modelización de consumos de agua y energía en hoteles de sol y playa. PASOS. *Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 12(4), 807-818.
- Gössling, S. (2006) "Tourism and water". In: Gössling, S. & Hall, M. (Eds.) *Tourism & global environmental change: Ecological, social, economic and political interrelationships*. Routledge, Abingdon. 180-194
- Gössling, S. (2018) "Tourism, tourist learning and sustainability: an exploratory discussion of complexities, problems and opportunities". *Journal of Sustainable Tourism*. 26(2), 292-306. DOI: 10.1080/09669582.2017.1349772.
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J. P., & Dubois, G. &. (2012). "Tourism and water use: Supply, demand, and security. *An international review. Tourism Management*.
- HCMA Architecture + Desing. (2016). *Natural Swimming Pools*. The future of public swimming without chlorine.
- Houbron, Eric. (2010). *Calidad del agua. Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz*. Gobierno del Estado de Veracruz. 205 -273.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Jalcomulco Veracruz de Ignacio de la Llave*.

- Karczmarczyk, A., Bus A., & Baryla A. (2019). Influence of operation time, hydraulic load and drying on phosphate retention capacity of mineral filters treating natural swimming pool water. *Ecological Engineering*. 130, 176-183.
- Kircher, W., & Thon, A. (2016). *How to Build a Natural Swimming Pool*. London: Filbert Press.
- Mitsch, W. J. (2012). What is ecological engineering?. *Ecological Engineering*, 45, (5-12).
- Mafrá, Paulo., Rodrigues, Maria José., Martins, Maria da Conceição., Gonçalves, Adorinda (Coords.). (2017). *7.º Encontro de educação ambiental: livro de atas*. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Educação. ISBN 978-972-745-227-9
- México Ambiental. (2021). *La restauración del manglar y evitar la contaminación, decisivos para recuperación ecológica de la laguna de Bacalar*. <https://www.mexicoambiental.com/la-restauracion-del-manglar-y-evitar-la-contaminacion-decisivos-para-recuperacion-ecologica-de-la-laguna-de-bacalar/>.
- Noticias RTV. (22 de diciembre del 2022). (G. Alamilla, Editor). Obtenido de Agencia de Noticias RTV *Resultados muy positivos del sector turismo para Veracruz en 2022*. <https://www.masnoticias.mx/resultados-muy-positivos-del-sector-turismo-para-veracruz-en-2022/>.
- Plan Municipal de Desarrollo 2022 - 2025 Jalcomulco (2022). Gobierno Municipal de Jalcomulco, Ver.
- Programa de Conservación de cuencas costeras en el contexto de cambio climático C6. (2017). *Plan de Acción de Manejo Integral (PAMIC) Cuenca del Río Antigua*.
- Quintero, F., Guardia-Puebla, Y., & Rodríguez-Pérez, S. (2017). La fitorremediación para el tratamiento de aguas de piscinas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 38(3), 101-113.
- Saldaña Rosas, A. J., & Saldaña Santiago, A. (2018). Los relatos de vida en el análisis organizacional: el modelo de negocios de Jalcomulco, Veracruz. *Administración Y Organizaciones*, 18(34), 73–91. Recuperado a partir de <https://rayo.xoc.uam.mx/index.php/Rayo/article/view/63>.
- Saldaña, A., Cardoso C.J. & León, K. (2012). El Agrupamiento Empresarial De Jalcomulco, Veracruz: La institucionalización de un modelo de negocio en el turismo de aventura en México. *Ciencia Administrativa*, 2, 25-36.
- Santacruz De León, E. E., & Santacruz De León, G. (2020). Consumo de agua en establecimientos hoteleros de México. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 29(1), 120-136.
- SECTUR. (2022). *Compendio estadístico del turismo en México*.

- Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEGVER). (2020). *Cuadernillos Municipales 2020*. Jalcomulco.
- Torres, B. (2019). El sargazo en las costas mexicanas. Universidad Veracruzana. Dirección de Comunicación de la Ciencia. *Revista La Ciencia y el Hombre*, 32 (1), 42.
- Sánchez-Ríos CP, Trejo-Perea M, Sánchez-Ríos LD, Sánchez-Ríos MF. (2020). Implementación de piscinas naturales: una alternativa de mejora para los efectos en la vía respiratoria por exposición a piscinas cloradas. *Neumol Cir Torax*. 2020; 79(3): 197-203. <https://dx.doi.org/10.35366/96656>.
- UNESCO. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París.
- UNESCO. (2023). *Alianzas y cooperación por el agua. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023. Datos, cifras y ejemplos de acción*.
- Universo. (17 de febrero del 2003). (Sotelo G., Editor). Obtenido de Universidad Veracruzana Trabajan académicos de Arquitectura. En pro de Jalcomulco. <https://www.uv.mx/universo-hemeroteca/92/Date%20Vuelo/vuelo2.htm>.
- Zalewski, Maciej. (2002). *Guidelines for integrated management of the watershed: phytotechnology and ecohydrology*. Freshwater Management Series. 5.
- Zitácuaro, C. I., Marín-Muñiz J. L., León E. X. Del Alba., Vidal A. M., Dos Santos A. L. B., Zamora C. Sergio. A. (2022). Humedales artificiales en México como alternativa sustentable para sanear las aguas residuales comunitarias: análisis de la importancia de la vegetación ornamental y el enfoque de género. *Sostenibilidad, Ambiente y Sociedad*. Los retos de la sostenibilidad en las geografías urbana y rural. Universidad Veracruzana y El Colegio de Veracruz. Xalapa, México. 381-407.

Tratamiento de lixiviados mediante humedales construidos bajo un enfoque de economía circular y su reúso en la producción de hortalizas

Leachate treatment by constructed wetlands within a circular economy framework and treated effluent reuse for vegetable cultivation

Erandy Saray Hernández Rivera., Georgina Martínez-Reséndiz., Graciela Elizabeth Nani González., Luis Carlos Sandoval Herazo

Resumen

El estudio evaluó los humedales construidos como alternativa sostenible para el tratamiento de lixiviados generados por residuos cítricos, bajo un enfoque de economía circular. Se analizaron sistemas vegetados con *Typha latifolia*, *Arundo donax*, *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*, determinando la remoción de DQO, nitrógeno, fósforo y sus diferentes formas. Los resultados mostraron eficiencias superiores al 97% para diversos parámetros, destacando *Canna indica* y *Arundo donax*. La inversión inicial del humedal fue de USD 902.77, evidenciando su bajo costo. Además, se evaluaron costos operativos, rentabilidad y reúso del efluente tratado para producción hortícola, fortaleciendo su potencial ambiental y económico.

Palabras clave: Economía circular, reúso de efluentes, lixiviados, cítricos

Abstract

This study assessed constructed wetlands as a low impact technological option for remediating citrus waste derived leachate under an explicit circular economy paradigm. Vegetated wetland mesocosms were planted with *Typha latifolia*, *Arundo donax*, *Canna indica* and *Zantedeschia aethiopica*. Treatment performance was quantified through removal rates for chemical oxygen demand (COD), total nitrogen and total phosphorus alongside analysis of individual nutrient fractions. Multiple water quality parameters achieved removal efficiencies exceeding 97%; *Canna indica* and *Arundo donax* delivered particularly strong pollutant attenuation performance. Capital investment for the experimental wetland totalled USD 902.77, demonstrating favorable low-cost characteristics. Additional evaluation encompassed operational expenditure, economic profitability, and the agronomic

suitability of treated effluent for vegetable crop irrigation, reinforcing both the environmental and socioeconomic potential of this circular economy intervention.

Keywords: Circular economy, reuse of effluents, leachates, citrus fruits

Introducción

El enfoque lineal predominante del desarrollo, enfocado en la extracción de recursos, su uso y la eliminación de desechos, ha generado una severa presión sobre los ecosistemas y un incremento en los residuos. Estas situaciones que se intensifican con el aumento demográfico y la expansión económica, que conlleva el agotamiento de recursos finitos, daños a los ecosistemas terrestres e impactos adversos en la salud humana. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) afirma que, para el año 2050 será necesario aumentar en un 70% la producción mundial de alimentos para satisfacer las necesidades de una población en constante crecimiento (FAO, 2009). Sin embargo, cada año son desechados más de 1,300 millones de toneladas de alimentos, lo que representa aproximadamente un tercio de toda la producción mundial (FAO, 2011).

Dentro de este marco de demanda alimentaria y desperdicio, el sector citrícola representa una actividad agrícola de gran importancia a nivel global. La producción mundial comprende principalmente naranjas, mandarinas, limones, limas, toronjas y pomelos. En América, México se encuentra entre los países líderes en el mercado de cítricos (USDA, 2023), destacando en la producción de naranja dulce (*Citrus sinensis* L. Osbeck), limas (*C. aurantifolia* [Christm.] Swingle y *C. latifolia* Tanaka) y limón (*C. limon* L. Burm.f.), desempeñando un papel clave tanto en la economía nacional como en la actividad industrial. Este sector presenta un valor de producción estimado en USD 2,400 millones y el potencial de generar hasta 28 millones de empleos anuales (Villar-Luna et al., 2024).

El sector citrícola mexicano constituye, por tanto, una actividad agrícola de gran relevancia económica y productiva, tanto para el abastecimiento del mercado nacional como para el comercio internacional. De acuerdo con la Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (DGSIA), en 2024 México produjo aproximadamente 4.84 millones de toneladas de naranja, 3.28 millones de toneladas de limón, 0.48 millones de toneladas de toronja y más de 310 mil toneladas de mandarina, consolidando su posición entre los principales productores mundiales. Asimismo, se reporta que de la producción total de cítricos en el país (8.4

millones de toneladas), alrededor del 10.7% se destina al procesamiento industrial (FAO, 2020)

Aunque la proporción destinada al procesamiento industrial representa una fracción del total, tanto la transformación industrial como el consumo en fresco generan volúmenes considerables de subproductos residuales, constituidos principalmente por cáscaras, bagazo, semillas y frutos descartados (Medina-Herrera et al., 2024). En este sentido, la elevada producción citrícola nacional no solo representa un pilar económico, sino también una fuente considerable de biomasa residual susceptible de ser aprovechada mediante estrategias de valorización.

En el contexto nacional, el estado de Veracruz constituye el territorio citrícola más estratégico y con mayor concentración productiva de México. En 2024, la entidad produjo aproximadamente 2.55 millones de toneladas de naranja (equivalentes al 51.5% de la producción nacional registrada por el SIAP), 866,862 toneladas de limón (posicionándose como el segundo productor nacional después de Michoacán), 149 mil toneladas de mandarina y 275 mil toneladas de toronja, encabezando la producción nacional de este último cultivo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2026). Estos volúmenes evidencian la relevancia de Veracruz y ponen de manifiesto la alta disponibilidad de biomasa residual en la región. La acumulación de cáscaras, semillas, bagazo y fruta en descomposición representa una oportunidad clave para el desarrollo de estrategias orientadas al manejo sostenible de residuos bajo un enfoque de economía circular.

En todo el mundo se generan grandes cantidades de residuos del procesamiento de cítricos, tras el procesamiento, la industria citrícola genera aguas residuales y residuos sólidos/semisólidos (Zema et al., 2018). El manejo de los residuos citrícolas se ha limitado a la alimentación animal o a su disposición final en vertederos; sin embargo, estas prácticas generan severos problemas ambientales. La mala gestión de estos subproductos, carente de métodos eficientes de reducción, ejerce una presión creciente sobre los recursos naturales y contribuye al daño ecológico, derivando en la pérdida de recursos potencialmente valorizables. La gestión incorrecta de la biomasa cítrica y de sus lixiviados representa un desafío multidimensional:

- **Impacto Ambiental:** Genera lixiviados con alta carga orgánica (Abdel-Shafy et al., 2024) que afectan la calidad del agua y del suelo, poniendo en riesgo las aguas subterráneas (Parvin & Tareq, 2021).
- **Impacto Financiero:** Requiere cuantiosas inversiones en tratamiento y purificación de fuentes de agua potable contaminadas, además de provocar

pérdidas económicas asociadas a la disminución de la productividad en suelos agrícolas degradados (Han et al., 2024).

- **Salud Pública y Socioeconomía:** Incrementa los riesgos para la salud humana (Gunarathne et al., 2024), elevando los gastos en atención médica y reduciendo la productividad laboral por exposición a contaminantes.

Frente a la ineficacia del sistema lineal tradicional, la Economía Circular (EC) emerge como un modelo sostenible basado en la reducción, reutilización y reciclaje de materiales para minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia económica (Fatimah et al., 2023). La EC ofrece un marco eficaz para la gestión sostenible del agua y de los efluentes residuales (Morseletto et al., 2022). En lugar de descartar las naranjas en descomposición, su alto contenido de materia orgánica y nutrientes permite transformarlas en productos de alto valor comercial, evitando la pérdida de recursos y el daño al medio ambiente. El cambio hacia una economía circular implica transformaciones en todas las etapas de producción y consumo.

En el ámbito del tratamiento de aguas residuales y efluentes agroindustriales, los Humedales Construidos (HC) han ganado reconocimiento como una tecnología efectiva, económica y ambientalmente sostenible. Los HC requieren menores costos de operación y mantenimiento, en comparación con sistemas convencionales, ofreciendo un gran potencial de aplicación en países en desarrollo y comunidades rurales. Los HC recrean los procesos naturales de depuración (Martínez-Reséndiz et al., 2025) mediante la creación de áreas de inundación donde el agua residual fluye a través de un sustrato poroso (como arena, grava, zeolita o roca volcánica (Herazo et al., 2021; Sandoval-Herazo et al., 2021; Viveros et al., 2022; Wang et al., 2018), permitiendo que la vegetación y los microorganismos de la rizósfera filtren y degraden los contaminantes. Estos sistemas han demostrado capacidad para remover materia orgánica, nitrógeno y sólidos presentes en los lixiviados (Jiménez Cerón et al., 2018), además de ser sistemas económicos, eficientes y sostenibles (Ji et al., 2022).

Además, la integración de la producción de hortalizas representa una vía prometedora para cerrar el ciclo de aprovechamiento del agua y los nutrientes recuperados; estudios sobre el reúso de lixiviados tratados indican que, tras tratamientos adecuados, el agua alcanza condiciones aptas para el riego agrícola. A pesar de su eficacia y versatilidad, la optimización de los humedales construidos requiere abordar desafíos de diseño, rendimiento estacional y aceptación social mediante un enfoque multidisciplinario que involucre a autoridades locales, instituciones académicas y a la comunidad (Masoud et al., 2022).

Por lo tanto, este capítulo tiene como objetivo mostrar una vía económicamente viable y técnicamente sostenible para enfrentar los desafíos del tratamiento de lixiviados en la industria cítrica. A través de un modelo de Economía Circular que integra HC, se busca optimizar la remoción de contaminantes, mitigar los impactos ambientales negativos, fomentar la recuperación de agua y nutrientes, y generar beneficios económicos sostenibles en alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas.

Metodología

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Mianzta (Figura 1), Veracruz, México, el cual se encuentra ubicado en la zona centro montañosa del Estado de Veracruz, México, en las coordenadas 19° 56' latitud norte y 96° 51' longitud oeste, a una altura de 300 metros sobre el nivel del mar, su clima es cálido-húmedo-regular con una temperatura promedio de 22.7° C; su precipitación pluvial media anual es de 2,036.4 mm.

Obtención del lixiviado

El lixiviado cítrico se obtuvo a partir de los líquidos generados durante la acumulación y descomposición de los residuos orgánicos. La recolección se realizó procurando evitar la incorporación de materiales sólidos de gran tamaño, suelo u otros materiales ajenos al residuo de interés. Durante la recolección, se tomaron algunas precauciones para poder prevenir la inclusión de sólidos grandes, como la tierra u otros elementos que no estén relacionados con el residuo a investigar. El líquido recolectado fue almacenado en contenedores especialmente preparados para su conservación y transporte, posteriormente los contenedores fueron etiquetados con datos sobre el origen de la muestra y la fecha de recolección, con el fin de asegurar la trazabilidad del material a lo largo de las distintas fases del experimento.

Tratamiento de lixiviados mediante humedales construidos

Previo al inicio del tratamiento, se realizó la preparación de los humedales construidos, verificando las condiciones físicas y operativas necesarias para su funcionamiento. Los sistemas fueron acondicionados de acuerdo con el diseño experimental establecido, considerando elementos como el recipiente o unidad de tratamiento, el medio de soporte, la vegetación y los puntos de entrada y salida del agua.

Antes de iniciar la aplicación del lixiviado se verificó la integridad de las unidades experimentales, procurando evitar fugas, obstrucciones o condiciones que pudieran alterar el flujo del agua. Asimismo, se comprobó que el sistema permitiera el contacto adecuado entre el lixiviado, el medio de soporte, los microorganismos asociados y la zona radicular de las plantas.

Vegetación

La vegetación constituyó un componente fundamental del sistema experimental. Para el tratamiento se consideraron especies macrófitas seleccionadas por su capacidad de desarrollarse en ambientes con elevada disponibilidad de agua y por su potencial participación en procesos de depuración.

Las especies consideradas fueron:

- *Typha latifolia* (tule).
- *Arundo donax* (carrizo).
- *Canna indica* (caña).
- *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz).

Las plantas fueron establecidas en las unidades correspondientes y se permitió su adaptación antes de la aplicación del lixiviado, de acuerdo con las condiciones definidas para el experimento.

Recolección de efluente tratado

El agua que atravesó el sistema de humedales fue recolectada como efluente tratado en los puntos establecidos para tal fin. Las muestras fueron identificadas y manejadas bajo las condiciones correspondientes al protocolo de análisis utilizado en la investigación.

El efluente obtenido constituyó la base para la siguiente etapa experimental, correspondiente a la determinación de parámetros de calidad del agua. Los resultados fueron comparados con los obtenidos para el lixiviado de entrada con el propósito de determinar el comportamiento del sistema y estimar la eficiencia de remoción de los contaminantes evaluados.

La evaluación de la calidad del agua se llevó a cabo a través de la determinación de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), fosfato, nitrito, nitrato y amonio. Se eligieron estos parámetros porque son fundamentales para determinar la cantidad de materia orgánica y las diversas formas de nutrientes,

así como para revisar el funcionamiento que tiene el sistema de humedales construidos durante el tratamiento.

Se analizó la efectividad del humedal construido cuando se compararon los niveles de los parámetros analizados de la entrada y salida. Esto facilitó la identificación de las transformaciones ocurridas en el proceso de tratamiento y para establecer la capacidad del sistema para reducir la carga contaminante del lixiviado.

Para los parámetros en los que se contó con concentraciones iniciales y finales, la eficiencia de remoción podrá calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100, \text{ donde:}$$

(C_i) = concentración del parámetro en el afluente inicial.

(C_e) = concentración del parámetro en el efluente tratado.

Los resultados obtenidos permitieron identificar los parámetros que presentaron una mayor reducción y aquellos que mostraron un comportamiento menos favorable durante el tratamiento.

Rentabilidad de un humedal construido vinculado con la economía circular

La evaluación económica se basó en el costo de inversión inicial (CAPEX), estimado como la suma de los costos de construcción del sistema, incluyendo obra civil, materiales, infraestructura hidráulica, vegetación y mano de obra del humedal de tratamiento.

Para determinar el costo anualizado hay que tomar en cuenta el tiempo de vida de cada componente (en años) y una tasa de descuento utilizando la siguiente fórmula de la ecuación 1:

$$CAPEX = \frac{Po * i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n}$$

Ecuación 1 CAPEX

CAPEX: Valor anualizado de mantenimiento de capital por componente [USD/año]

Po: Costo de inversión de cada componente en USD

i: Tasa de descuento [%]

n: Vida útil del componente en años

Los gastos de operación OPEX son la agrupación de los costos de operación y mantenimiento, donde se incluye la mano de obra, insumos, los costos de energía, el mantenimiento rutinario y los análisis de laboratorio. En la figura 1, se resume la metodología descrita.

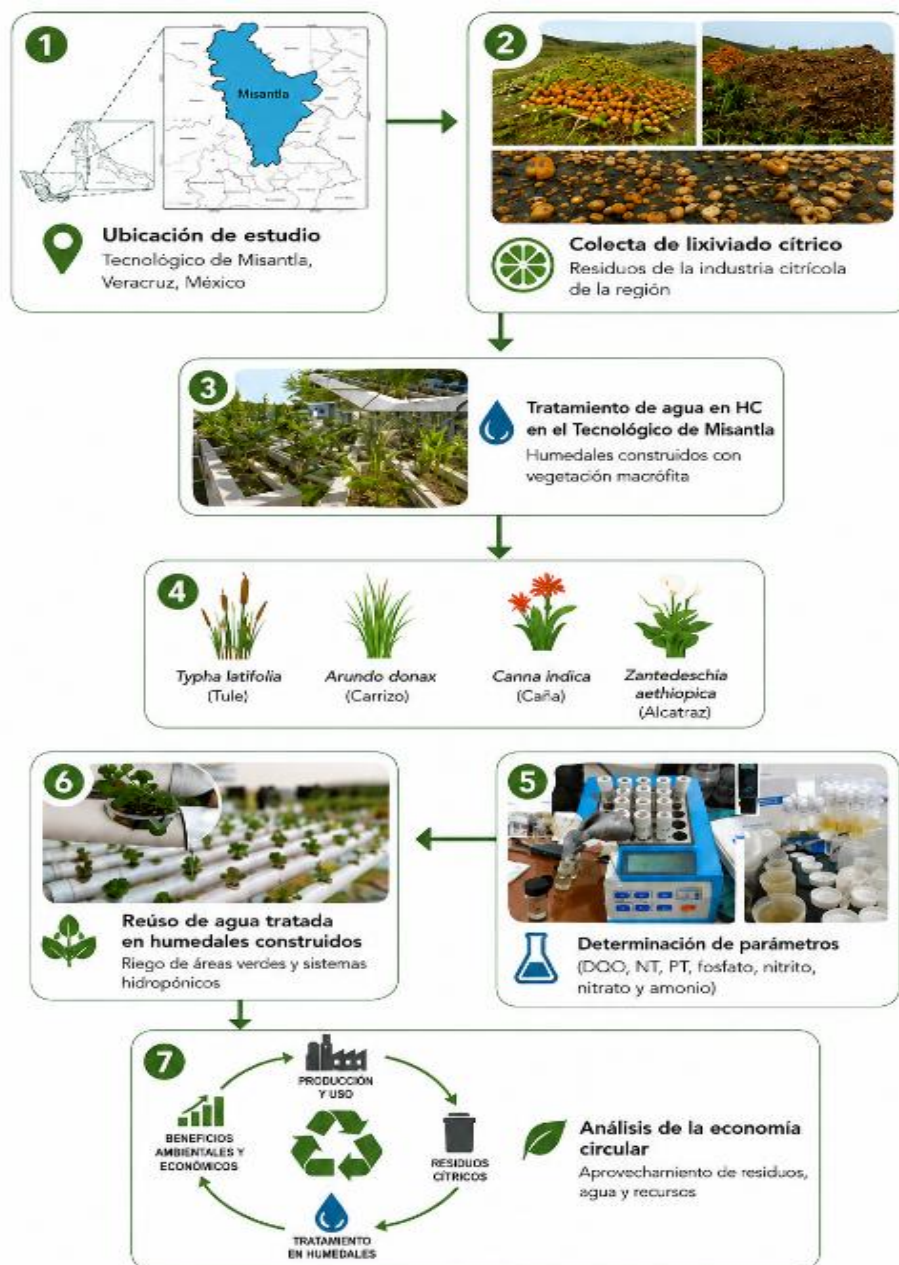


Figura 4. Esquema metodológico

Resultados y discusión

En términos generales, *Canna indica* presentó el desempeño más consistente, con eficiencias de remoción superiores al 97% para DQO, nitrato, amonio y FT, además de 84.87% para fosfato. *Zantedeschia aethiopica* mostró un comportamiento similar, con eficiencias superiores al 93% para DQO y amonio y valores cercanos al 95% para FT. *Arundo donax* alcanzó la mayor remoción de DQO (99.86%) y mostró una elevada capacidad de remoción de nitrato (82.40%), fosfato (83.55%) y FT (95.65%). En contraste, *Typha latifolia* presentó un desempeño más heterogéneo, con una elevada remoción de DQO (98.36%) y FT (91.97%), pero valores negativos para nitrato, nitrito y NT. Estos resultados sugieren que la eficiencia del tratamiento depende de manera importante de la especie vegetal y del contaminante considerado. Los valores negativos deben interpretarse con cautela, ya que podrían indicar valores muy pequeños, no detectables por los equipos utilizados, más que una remoción efectiva. En particular, el comportamiento del nitrito, con valores negativos en todas las especies podría estar asociado con procesos de transformación del nitrógeno dentro del sistema, por lo que su interpretación requiere considerar conjuntamente las concentraciones de nitrato, nitrito, amonio y nitrógeno total.

En este apartado se muestran los resultados de las estimaciones del CAPEX Y OPEX para el humedal construido del ITSM (Tabla 1), donde se calculó que el monto total invertido en el humedal construido asciende a \$1,153.41 USD. Usando la formula mencionada previamente para cada uno de los elementos clave del HC, se establece un CAPEX anualizado de \$124.85USD/año. La inversión inicial total de \$1,153.41 USD confirma que los humedales construidos constituyen una tecnología descentralizada de bajo costo. Al comparar este requerimiento de capital con plantas de tratamiento convencionales de lodos activados o reactores secuenciales por lotes (SBR), la literatura reporta que las tecnologías mecánicas requieren inversiones iniciales que superan con frecuencia los \$5,000–\$15,000 USD para escalas pequeñas de tratamiento rural o piloto avanzado (Zhang et al., 2025; Kadlec & Wallace, 2008). El carácter pasivo del HC elimina la necesidad de bombas de alta potencia o sopladores de aireación, reduciendo drásticamente los costos en infraestructura electromecánica.

Tabla 1 CAPEX del humedal de tratamiento

CAPEX HUMEDAL DE TRATAMIENTO				
Item	Descripción	Costo total [USD]	Vida útil (años)	Costo (USD/año)
1	Estructura de block y concreto	\$ 396.28	30	\$ 25.78
2	Base del tinaco	\$ 58.68	30	\$ 3.82
3	Tinaco de 1100 L	\$ 295.16	20	\$ 23.68
4	Tuberías y accesorios PVC	\$ 64.11	20	\$ 5.14
5	Platas	\$ 250.63	5	\$ 57.89
6	Tezontle	\$ 88.55	15	\$ 8.53
Total		\$ 1,153.41		\$ 124.85

Fuente: Elaboración propia

Miwornunyuie et al., (2025) destacan a los HC como la solución más rentable (USD 627/m³), con CW-MFC emergiendo como una alternativa competitiva al considerar los beneficios ambientales y las eficiencias operativas (USD 718/m³). Este estudio resalta el potencial de los sistemas híbridos, para impulsar tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas residuales, minimizando el impacto ambiental y mejorando la recuperación de recursos, lo que favorece su adopción generalizada en futuras estrategias de gestión del agua.

De acuerdo con lo que se muestra en la Tabla 2, se registró un OPEX de \$1,727.50 USD. El elemento clave del OPEX fue el análisis en laboratorio, que constituyo alrededor del 74.3% de los gastos operativos anuales, esto está relacionado a la regularidad del control que se definió en la fase de experimentación, donde se llevaron a cabo pruebas cada 15 días. Esto se alinea con la separación que realizan las investigaciones sobre los costos de los humedales: los gastos e inversión están relacionados con la edificación y partes del sistema, mientras que los costos de funcionamiento abarcan las tareas requeridas a lo largo de su uso y cuidado.

Tabla 2 OPEX del humedal de tratamiento

OPEX HUMEDAL DE TRATAMIENTO				
Item	Descripción	Costo (USD/periodo)	No. Periodo/año	Costo (USD/año)
1	Mano de obra	\$ 88.55	1	\$ 88.55
2	Análisis de laboratorio	\$ 53.53	24	\$ 1,284.77
3	Poda/Limpieza	\$ 59.03	6	\$ 354.19
Total				\$ 1,727.50

Fuente: Elaboración propia

Este método de dividir los gastos de capital y los gastos operativos es empleado en análisis económicos de sistemas para el tratamiento de aguas y humedales construidos. Investigaciones concretas sobre HC han analizado de forma individual los gastos de construcción/inversión, así como los gastos de operación y mantenimiento.

Análisis financiero del sistema hidropónico

Para saber si el sistema hidropónico es factible o no, debemos de realizar una evaluación financiera, para la cual se obtuvo una inversión inicial de \$164.76 USD (Tabla 3), en donde se integran los activos fijos, activos diferidos y capital de trabajo. Los activos fijos representaron 131.11 USD, correspondientes al equipo de trabajo y la construcción del sistema; los activos diferidos ascendieron a 29.52 USD por concepto de mano de obra de instalación, mientras que el capital de trabajo inicial correspondió a 4.13 USD destinados a la adquisición de semillas. Esta estructura es consistente con estudios recientes de evaluación económica de sistemas hidropónicos, en los cuales se consideran los costos de implantación inicial y posteriormente los costos de operación para determinar la viabilidad financiera del sistema (Bello Parra et al., 2024; Morais et al., 2024).

Tabla 3 Presupuesto de inversión del sistema hidropónico

PRESUPUESTO DE INVERSIÓN [USD]								
Conceptos	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Montos		Total		
ACTIVO FIJO								
Renta de terreno				\$	-	\$	-	
Equipo de Trabajo	-	1	\$	70.84	\$	70.84	\$	70.84
Construcción del sistema hidropónico	Construcción	1	\$	60.27	\$	60.27	\$	60.27
Subtotal						\$	131.11	
ACTIVO DIFERIDO								
Mano de obra	Presupuesto	1	\$	29.52	\$	29.52	\$	29.52
Subtotal						\$	29.52	
CAPITAL DE TRABAJO								
Semillas	Sobre	2	\$	2.07	\$	4.13	\$	4.13
Subtotal						\$	4.13	
Total						\$	164.76	

Fuente: Elaboración propia

Memoria de cálculo

Para conocer de dónde surge el costo obtenido de la construcción del sistema hidropónico, se realizó una memoria de cálculo (Tabla 4) en donde se describe la cantidad requerida de cada material, el costo unitario y el total.

Realizar esta clasificación es muy importante, ya que, permite comprobar que la estimación que se muestra en el presupuesto de inversión como se muestra en la Tabla 3 es verídica.

Tabla 4 Construcción para un sistema hidropónico

CONSTRUCCIÓN PARA UN SISTEMA HIDROPÓNICO				
Concepto	Unidad	Cantidad	Costo [USD]	Total [USD]
Reducciones de PVC	Pieza	6	\$ 0.71	\$ 4.25
Codo de 3 in	Pieza	6	\$ 1.06	\$ 6.38
Codo de 2 in	Pieza	2	\$ 0.71	\$ 1.42
Pegamento para PVC	Pieza	1	\$ 2.95	\$ 2.95
Lija 1 m	Rollo	1	\$ 1.18	\$ 1.18
Tuvo de PVC hidráulico 3 m	Pieza	5	\$ 2.36	\$ 11.81
Coples de 3 in	Pieza	6	\$ 0.71	\$ 4.25
T de PVC 2 in	Pieza	5	\$ 0.89	\$ 4.43
Tuvo de 2 in PVC 3 m	Pieza	1	\$ 4.13	\$ 4.13
Tuvo de 3 in PVC 6 m	Pieza	1	\$ 12.99	\$ 12.99
Tuvo de 3 in PVC 3 m	Pieza	1	\$ 6.49	\$ 6.49
Total				\$ 60.27

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en esta memoria de cálculo (Tabla 5) el costo total de esta inversión es de \$70.84 USD, ya que la mayor parte de este rubro pertenece a la bomba acuática con \$47.23 USD, lo que equivale al 66.67% del total. Mientras que la broca y la tina representan un costo individual de \$11.81 USD, donde cada una representa el 16.67%.

Tabla 5 Equipo de trabajo

EQUIPO DE TRABAJO				
Concepto	Unidad	Cantidad	Costo [USD]	Total [USD]
Broca	Pieza	1	\$ 11.81	\$ 11.81
Bomba acuática	Pieza	1	\$ 47.23	\$ 47.23
Tina	Pieza	1	\$ 11.81	\$ 11.81
Total				\$ 70.84

Fuente: Elaboración propia

Wang et al., (2023), hicieron un balance entre la producción convencional y la hidroponía de lechuga, por lo tanto, realizaron una evaluación financiera a cerca del sistema hidropónico. Y en su análisis de la inversión inicial tomaron en cuenta ciertos elementos como los canales de cultivo, la estructura, el tanque de solución nutritiva. Por eso es necesario tomar en cuenta el equipo de trabajo porque forman parte del presupuesto de inversión como se mostró en la Tabla 3.

En los costos de operación como se muestra en la Tabla 6 se estima que el mantenimiento presento un porcentaje mayor con el 57.37%, seguido con el servicio de luz con un 16.38%, mientras que los salarios representaron un 26.24%. Es por ello, que la importancia de estos componentes concuerda con estudios financieros donde fueron realizados en sistemas hidropónicos, en donde el servicio de luz (energía), el mantenimiento y los salarios constituyen elementos que son relevantes para poder establecer el costo de producción. Como se mencionó anteriormente el servicio de luz presentó un 16.38%, esto equivale a \$5.90 USD por periodo de los costos que se consideraron. Por lo tanto, este resultado se asemeja a investigaciones recientes como la de Ali et al., (2026) donde se menciona la producción hidropónica, y que la electricidad se ha identificado como un componente relevante en los costos de operación.

Tabla 6 Cálculos de costos de operación

COSTOS DE OPERACIÓN	
Contabilidad	Costo por periodo [USD]
Salarios	\$ 9.45
Servicio de luz	\$ 5.90
Mantenimiento	\$ 20.66
Otros	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 se considera un jornal para realizar la actividad de germinación con un valor de \$9.45 USD, por lo tanto, los costos de operación y los cálculos jornales se someten a una escala anual como se presenta en la Tabla 8, para poder conocer cuanto representa mantener funcionando el sistema durante cada actividad.

Tabla 7 Cálculos jornales

CÁLCULOS JORNALES					
Actividad	Jornales por germinación	Monto unitario			Total [USD]
Germinar las semillas	1	\$	9.45	\$	9.45
Total				\$	9.45

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 8, en la proyección anual se concentran los gastos necesarios para poder mantener activo el sistema hidropónico durante los 5 años. Mientras tanto el mantenimiento representa un gasto elevado de \$123.97 USD en el primer año a \$181.50 USD en el quinto año, ya que, se puede decir que este crecimiento corresponde a la aplicación de un incremento anual sobre los gastos.

Aunque las cantidades producidas permanezcan bajo los supuestos establecidos, mantener la operación se vuelve gradualmente más costoso, es importante para la evaluación financiera porque los ingresos también deben crecer a un ritmo suficiente para compensar el aumento de los gastos. Es por ello, que los HC en algunos lugares sustituyen a las plantas de tratamiento existentes ya que se deterioran y disminuyen aún más debido a la creciente presión del crecimiento demográfico (Wada et al., 2026).

Tabla 8 Gastos y costos de operación anual

GASTOS Y COSTOS DE OPERACIÓN ANUAL [USD]										
Conceptos/Años	Año 1		Año 2		Año 3		Año 4		Año 5	
Servicio de luz	\$	35.42	\$	38.96	\$	42.86	\$	47.14	\$	51.86
Mantenimiento	\$	123.97	\$	136.36	\$	150.00	\$	165.00	\$	181.50
Salarios	\$	56.67	\$	62.34	\$	68.57	\$	75.43	\$	82.97

Fuente: Elaboración propia

La proyección de los costos de operación del sistema hidropónico mostró un incremento progresivo durante el horizonte de evaluación de cinco años, pasando de 216.06 USD en el primer año a 316.33 USD en el quinto año, bajo un supuesto de incremento anual del 10%. El mantenimiento representó el principal componente de

los costos durante todo el periodo de análisis, mientras que los salarios y el servicio de electricidad presentaron una menor participación relativa. Este comportamiento evidencia que, bajo las condiciones económicas consideradas, las actividades asociadas al mantenimiento constituyen el principal requerimiento económico para mantener la operación del sistema hidropónico. La utilización de proyecciones plurianuales resulta consistente con estudios de evaluación económica de sistemas hidropónicos que emplean análisis de costos durante varios años para valorar la viabilidad económica de los sistemas de producción como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Proyección de costos

PROYECCIÓN DE COSTOS [USD]								
Costos del proyecto	Costos	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año
Concepto	Costos Por bimestre	1	2	3	4	5		
Salarios	\$ 9.45	\$ 56.67	\$ 62.34	\$ 68.57	\$ 75.43	\$ 82.97		
Servicios de luz	\$ 5.90	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86		
Mantenimiento	\$ 20.66	\$ 123.97	\$ 136.36	\$ 150.00	\$ 165.00	\$ 181.50		
Otros	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -		
Total	\$ -	\$ 216.06	\$ 226.86	\$ 238.20	\$ 250.11	\$ 262.62		

Fuente: Elaboración propia

Mientras que los costos totales que incluyen salarios y mantenimiento se reportan en la tabla 10.

Tabla 10 Costos totales

COSTOS TOTALES [USD]					
COSTOS FIJOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Salarios	\$ 56.67	\$ 62.34	\$ 68.57	\$ 75.43	\$ 82.97
Mantenimiento	\$ 123.97	\$ 136.36	\$ 150.00	\$ 165.00	\$ 181.50
Otros	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Total	\$ 180.64	\$ 198.70	\$ 218.57	\$ 240.43	\$ 264.47

COSTOS VARIABLES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Servicio de luz	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86
Total	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86

	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
COSTOS FIJOS	\$ 180.64	\$ 198.70	\$ 218.57	\$ 240.43	\$ 264.47
COSTOS VARIABLES	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86
COSTOS TOTALES	\$ 216.06	\$ 237.66	\$ 261.43	\$ 287.57	\$ 316.33

Fuente: Elaboración propia

Los ingresos provienen de la comercialización de cilantro y lechuga orejona. El cilantro tiene un precio de \$1.18 USD por unidad, mientras que la lechuga se considera en \$1.48 USD. Con una venta bimestral de 20 unidades para cada producto, se obtiene un ingreso de \$23.61 USD por cilantro y \$29.52 USD por lechuga. Al llevar esta producción a un año, el ingreso estimado para el primer ejercicio alcanza \$318.77 USD. Bajo el supuesto de crecimiento utilizado en la hoja, las ventas aumentan progresivamente hasta llegar a \$466.71 USD en el quinto año. Esto refleja que la generación de recursos del proyecto no depende de un solo producto, sino de dos cultivos que contribuyen conjuntamente a sostener los ingresos como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Proyección de ingresos totales

PROYECCIÓN DE INGRESOS TOTALES [USD]									
CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	VENTA BIMESTRAL	INGRESO BIMESTRAL	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	
Cilantro	\$ 1.18	20	\$ 23.61	\$ 141.68	\$ 155.84	\$ 171.43	\$ 188.57	\$ 207.43	
Lechuga orejona	\$ 1.48	20	\$ 29.52	\$ 177.10	\$ 194.81	\$ 214.29	\$ 235.71	\$ 259.29	
Total				\$ 318.77	\$ 350.65	\$ 385.71	\$ 424.29	\$ 466.71	

Fuente: Elaboración propia

El uso de la salida y el costo de venta como fundamento para calcular los ingresos se alinea con investigaciones económicas sobre sistemas de cultivo hidropónico. Por otro lado, Pryatnasari & Mursidah (2024) evaluaron los ingresos de cultivos hidropónicos basándose en la producción vendida y revelaron diferencias significativas entre los tipos de cultivos, evidenciando que la variedad cultivada tiene un impacto directo en los ingresos generados.

En la tabla 12 se muestran los resultados desglosados de conceptos de ventas, costos fijos, variables y totales, así como utilidad bruta, depreciación, impuestos y utilidad del ejercicio durante cinco años, mostrando a detalle los costos descritos.

Tabla 12 Estado de resultados

ESTADO DE RESULTADOS [USD]					
CONCEPTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ 318.77	\$ 350.65	\$ 385.71	\$ 424.31	\$ 466.71
COSTOS FIJOS	\$ 180.64	\$ 198.70	\$ 218.57	\$ 240.43	\$ 264.47
COSTOS VARIABLES	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86
(-) COSTOS TOTALES	\$ 216.06	\$ 237.66	\$ 261.43	\$ 287.57	\$ 316.33
(=) UTILIDAD BRUTA	\$ 102.72	\$ 112.99	\$ 124.29	\$ 136.74	\$ 150.39
(-) DEPRECIACION	\$ 6.45	\$ 6.77	\$ 7.11	\$ 7.46	\$ 7.83
(=) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 96.27	\$ 106.22	\$ 117.18	\$ 129.28	\$ 142.55
(-) IMPUESTOS	\$ 9.63	\$ 10.62	\$ 11.72	\$ 12.93	\$ 14.26
(=) UTILIDAD DEL EJERCICIO	\$ 86.64	\$ 95.60	\$ 105.46	\$ 116.35	\$ 128.30

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la tabla 13 se describen los costos de operaciones por activo fijo, equipo de trabajo y construcción del sistema hidropónico.

Tabla 13 Costos de operaciones

COSTOS DE DEPRECIACIONES [USD]					
ACTIVO FIJO	VALOR ORIGINAL	TASA	AÑOS	DEP ANUAL	VALOR RESCATE
EQUIPO DE TRABAJO	\$ 4.18	10%	5	\$ 0.42	\$ 2.09
CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA HIDROPÓNICO	\$ 60.27	10%	5	\$ 6.03	\$ 30.14
TOTAL	\$ 64.45			\$ 6.45	\$ 32.23

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14 se puede apreciar que el flujo de efectivo del sistema hidropónico se edificó a partir de los ingresos que se generaron por las ventas y los gastos que se asocian con la operación del sistema, tomando en cuenta la inversión inicial requerida para su funcionamiento. En el año cero se registró una inversión de \$164.76 USD, contemplada por la ganancia de los activos fijos con un el valor de \$131.11 USD, los activos diferidos de \$29.52 USD y por último, la capital de trabajo por \$4.13 USD.

En cuanto al primer año se obtuvieron flujos positivos como resultado de la diferencia entre los ingresos y los costos de operación. Este procedimiento está relacionado con análisis financieros de sistemas hidropónicos, por lo tanto, los beneficios y los costos correspondientes a cada periodo son manipulados para construir los flujos de efectivos para poder determinar los indicadores como el VAN Y TIR (Souza et al., 2023).

Tabla 14 Flujo de efectivo

FLUJO DE EFECTIVO [USD]						
CONCEPTOS / AÑO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ -	\$ 318.77	\$ 350.65	\$ 385.71	\$ 424.31	\$ 466.71
(+) VALOR DE RESCATE	\$ -		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(=) INGRESOS TOTALES	\$ -	\$ 318.77	\$ 350.65	\$ 385.71	\$ 424.31	\$ 466.71
COSTOS FIJOS	\$ -	\$ 180.64	\$ 198.70	\$ 218.57	\$ 240.43	\$ 264.47
COSTOS VARIABLES	\$ -	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86
(=) COSTOS TOTALES	\$ -	\$ 216.06	\$ 237.66	\$ 261.43	\$ 287.57	\$ 316.33
COMPRA ACTIVO FIJO	\$ 131.11	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA ACTIVO DIFERIDO	\$ 29.52	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA CAPITAL DE TRABAJO	\$ 4.13	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(=) SALDO FINAL	-\$ 164.76	\$ 102.72	\$ 112.99	\$ 124.29	\$ 136.74	\$ 150.39

Fuente: Elaboración propia

Lott et al., (2026), señalan que los costos de tratamiento durante la vida útil prevista de 30 años de un sistema de HC oscilan entre \$30 y \$11 m⁻³. Además, resalta que, el funcionamiento del sistema es más económico o comparable a otras estrategias de gestión de lixiviados.

Como se puede observar en la Tabla 15, el punto de equilibrio establece la cantidad de ventas necesarias para que el proyecto no sufra perdidas ni genere beneficios. En el primer año, se proyecta un punto de equilibrio de \$3,442.50 USD, que equivale al 64% de las ventas planeadas. Esto sugiere que, el sistema debe alcanzar aproximadamente el 64% de sus ventas pronosticadas para cubrir sus gastos.

Tabla 15. Punto de equilibrio del sistema hidropónico

PUNTO DE EQUILIBRIO DEL SISTEMA HIDROPÓNICO [USD]					
CONCEPTOS / AÑOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
VENTAS	\$ 318.77	\$ 350.65	\$ 385.71	\$ 424.31	\$ 466.71
COSTOS FIJOS	\$ 180.64	\$ 198.70	\$ 218.57	\$ 240.43	\$ 264.47
COSTOS VARIABLES	\$ 35.42	\$ 38.96	\$ 42.86	\$ 47.14	\$ 51.86
COSTOS TOTALES	\$ 216.06	\$ 237.66	\$ 261.43	\$ 287.57	\$ 316.33
PUNTO DE EQUILIBRIO \$	\$ 203.22	\$ 223.54	\$ 245.89	\$ 270.48	\$ 297.53
PUNTO DE EQUILIBRIO %	64%	64%	64%	64%	64%

Fuente: Elaboración propia

Este enfoque es coherente con los análisis financieros de sistemas de cultivo hidropónico, donde el equilibrio se establece mediante la interacción entre gastos fijos, el costo de venta y los costos variables por unidad (Elmulthum et al., 2023).

Además, investigaciones llevadas a cabo en sistemas de cultivo de lechuga en hidroponía han empleado el equilibrio como un parámetro para evaluar la rentabilidad económica de este método de producción (Adler et al., 2000).

Mientras tanto la evaluación financiera del sistema hidropónico (Tabla 16) dio resultados positivos en términos financieros durante un periodo de cinco años, ya que, en los ingresos se dio un total de \$1,946.16 USD, mientras que el total de costos fue de \$1,483.81 USD, lo cual genera un flujo neto de \$462.35 USD.

Tabla 16- Rentabilidad de un HC

RENTABILIDAD [USD]								
AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE EFECTIVO	TASA (1+t) ⁻ⁿ	INGRESOS ACTUALIZADOS	EGRESOS ACTUALIZADOS		
AÑO 0	\$ -	\$ 164.76	-\$ 164.76	1	\$ -	\$ 164.76		
AÑO 1	\$ 318.77	\$ 216.06	\$ 102.72	0.909090909	\$ 289.79	\$ 196.42		
AÑO 2	\$ 350.65	\$ 237.66	\$ 112.99	0.826446281	\$ 289.79	\$ 196.42		
AÑO 3	\$ 385.71	\$ 261.43	\$ 124.29	0.751314801	\$ 289.79	\$ 196.42		
AÑO 4	\$ 424.31	\$ 287.57	\$ 136.74	0.683013455	\$ 289.81	\$ 196.42		
AÑO 5	\$ 466.71	\$ 316.33	\$ 150.39	0.620921323	\$ 289.79	\$ 196.42		
TOTAL	\$ 1,946.16	\$ 1,483.81	\$ 462.35		\$ 1,448.98	\$ 1,146.83		

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se consideró una tasa de descuento del 10%. Por ende, el valor de los ingresos actualizados es de \$1,448.98 USD y el valor de los egresos es de \$1,146.83 USD, resultando un Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$302.15 USD reflejado en la Tabla 17. Este resultado es favorable, ya que, bajo las condiciones planteadas el sistema hidropónico puede recuperar la inversión inicial y producir un valor extra teniendo en cuenta el costo del capital. Es por ello, que este resultado coincide con análisis financieros recientes a cerca de sistemas hidropónicos, en donde el VAN, TIR, y B/C se usan en conjunto para poder determinar la rentabilidad de este tipo de sistemas (Souza et al., 2023).

Tabla 17. Resultados de VAN, TIR Y B/C

VAN	\$	302.15
TIR		64%
B/C		1.26

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la Tasa Interna de Retorno (TIR) fue de un 64%, lo que indica que tiene una rentabilidad interna que supera la ganancia mínima establecida para este proyecto. Este resultado puede relacionarse con la baja inversión inicial de \$164.76

USD en comparación con el flujo de efectivos positivos producidos desde el primer año que fueron variados entre \$102.72 USD hasta \$150.39 USD a lo largo del periodo de evaluación. Es por ello, que una TIR muy alta no debe de interpretarse de forma aislada como una tasa anual de ganancia, ya que su capacidad depende de la estructura de los flujos de efectivo. Investigaciones recientes han hecho estimaciones donde han mostrado que la estructura y la cantidad de inversión, así como los flujos de efectivo, poseen un resultado directo en el comportamiento de la TIR y existen otras investigaciones sobre análisis financieros que han encontrado que, las iniciativas con costos iniciales bajos y retornos importantes que pueden mostrar las tasas internas de retorno elevadas (Elzohairy et al., 2024).

Finalmente, la B/C es superior a 1, lo que significa que por cada peso invertido se recuperara la inversión. La recuperación de aguas residuales, que facilita la reutilización del agua, ha cobrado una importancia significativa. La reutilización de los efluentes generados en los humedales construidos ofrece una solución sostenible que combina beneficios ambientales y económicos. Esta práctica no solo mejora la gestión de los recursos hídricos y la calidad del agua, sino que también promueve una economía circular mediante la recuperación y reutilización de nutrientes y agua. La adopción de humedales construidos y la reutilización de sus efluentes es una estrategia integral que puede transformar la gestión de aguas residuales y contribuir al desarrollo sostenible.

En Australia, la implementación de HC para el tratamiento secundario de efluentes y la reutilización del agua ha cobrado relevancia, especialmente en regiones subtropicales y áridas (Greenway, 2005). Estos sistemas ofrecen soluciones efectivas y sostenibles para la gestión de aguas residuales, adaptándose a las necesidades particulares de estas zonas climáticas. Un caso sorprendente el que llevaron a cabo Lakho et al., (2020), donde gracias al tratamiento del agua en eventos temporales (como festivales) mediante un HC móvil lograron producir agua potable, la cual cumplió con los criterios legislativos.

Abdelmeguid et al., (2022) mencionan que, los ciclos biológicos (como por ejemplo los HC) son donde ocurre el consumo, y por lo tanto la gestión sostenible de los recursos de base biológica asegura la creación de flujos y procesos renovables. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas establecen el marco de acción de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Entre sus 17 objetivos, el ODS 12, Producción y consumo responsables, promueve el uso eficiente de los recursos y la gestión sostenible de los residuos. En este contexto, la economía circular propone superar el modelo lineal de extraer, producir y desechar, manteniendo los productos, componentes y materiales en circulación durante el

mayor tiempo posible y conservando su valor. Así, los residuos y subproductos pueden transformarse en recursos, favoreciendo la eficiencia y conciliando el desarrollo económico con la protección ambiental y el bienestar social (Gabriel & Luque, 2020).

Conclusiones

El tratamiento mediante humedales construidos fue planteado no solo como una estrategia de reducción de contaminantes, sino como una alternativa susceptible de integrarse en un modelo de economía circular. En este sentido, el proceso permitió establecer una conexión entre la generación de residuos de la actividad citrícola, el tratamiento del lixiviado, la recuperación de agua y su posible aprovechamiento posterior.

Este estudio permitió establecer la relación entre el tratamiento de lixiviados, la recuperación de recursos y el reúso del agua, elementos fundamentales para valorar la viabilidad ambiental y económica de la propuesta.

Bibliografía

- Abdelmeguid, A., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2022). Investigating the challenges of applying the principles of the circular economy in the fashion industry: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.009>
- Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., & Okasha, R. A. (2024). Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102293. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>
- Adler, P. R., Harper, J. K., Takeda, F., Wade, E. M., & Summerfelt, S. T. (2000). Economic Evaluation of Hydroponics and Other Treatment Options for Phosphorus Removal in Aquaculture Effluent. *HortScience*, 35(6), 993–999. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.6.993>
- Ali, M., Koh, L., Evans, T. P., & Nickles, J. (2026). Comparative environmental and economic life cycle assessment of hydroponic and in-field lettuce production in the UK. *Sustainable Futures*, 11, 101875. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2026.101875>
- Elmulthum, N. A., Zeineldin, F. I., Al-Khateeb, S. A., Al-Barrak, K. M., Mohammed, T. A., Sattar, M. N., & Mohmand, A. S. (2023). Water Use Efficiency and Economic Evaluation of the Hydroponic versus Conventional Cultivation Systems for Green Fodder Production in Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(1), 822. <https://doi.org/10.3390/su15010822>

- Elzohairy, H. R., Ahmed, T. S., & El-Marsafy, S. M. (2024). Ethane integration project — a study for Egyptian NGLs plants and their economics. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 169. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00500-z>
- FAO. (2009). *How to Feed the World in 2050*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. High-Level Expert Forum, Rome, 12-13 October 2009.
- FAO. (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO. (2020). *Citrus Fruit Statistical Compendium 2020*. . FAO. Citrus Fruit Statistical Compendium 2020. Rome. 2021. Available Online: <https://Openknowledge.Fao.Org/Server/Api/Core/Bitstreams/4760a5b5-F3b2-41c7-8713-Ccdb1a5f8c08/Content> (Accessed on 26 June 2026).
- Fatimah, Y. A., Kannan, D., Govindan, K., & Hasibuan, Z. A. (2023). Circular economy e-business model portfolio development for e-business applications: Impacts on ESG and sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137528>
- Gabriel, M., & Luque, M. L. D. (2020). *Sustainable Development Goal 12 and Its Relationship with the Textile Industry* (pp. 21–46). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8787-6_2
- Greenway, M. (2005). The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. *Ecological Engineering*, 25(5), 501–509. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.008>
- Gunarathne, V., Phillips, A. J., Zanoletti, A., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Di Maria, F., Pivato, A., Korzeniewska, E., & Bontempi, E. (2024). Environmental pitfalls and associated human health risks and ecological impacts from landfill leachate contaminants: Current evidence, recommended interventions and future directions. *Science of The Total Environment*, 912, 169026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169026>
- Han, Q., Zhao, H., Wei, G., Liu, H., Zhu, Y., Li, T., Lin, Y., & Su, X. (2024). Optimizing waste leachate treatment for environmental and economic sustainability: Insights from a bottom-up study of over 300 cities. *Sustainable Production and Consumption*, 49, 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.06.027>
- Herazo, L. C. S., Zurita, F., Nani, G., Del Ángel-Coronel, O. A., & Aguilar, F. A. A. (2021). Treatment of swine effluent mixed with domestic wastewater and vegetation development in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow wetlands. *Ecological Engineering*, 173, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106432>
- Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286, 131564. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131564>
- Jiménez Cerón, Y. F., Delgado Calvache, L. I., Fernández Tulande, C., Pino Alegría, H. M., Casas Zapata, J. C., Madera Parra, C. A., Lara Borrero, J. A., Morató Farreras, J.,

- & Rengifo Canizales, E. (2018). Tratamiento de lixiviados utilizando humedales construidos y determinación de conductividades hidráulicas en clima tropical. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.979>
- Lott, D. J., Laux, S., Collins, C., Sackles, H., & Townsend, T. G. (2026). Financial analysis & operational assessment of a constructed wetlands system for landfill leachate treatment – A case study. *Journal of Water Process Engineering*, 90, 110406. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110406>
- Martínez-Reséndiz, G., Ayala-Palomino, A. , & Hernández-Aggi, E. (2025). Economía Verde: El potencial de los humedales construidos en la valoración de ecosistemas. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo*, 4(1), 1–6.
- Medina-Herrera, N., Martínez-Ávila, G. C. G., Robledo-Jiménez, C. L., Rojas, R., & Orozco-Zamora, B. S. (2024). From Citrus Waste to Valuable Resources: A Biorefinery Approach. *Biomass*, 4(3), 784–808. <https://doi.org/10.3390/biomass4030044>
- Miwornunyuie, N., Alamu, S. O., Mao, G., Benani, N., Hunter, J., & Oguntimein, G. (2025). Comparative Life Cycle and Techno-Economic Assessment of Constructed Wetland, Microbial Fuel Cell, and Their Integration for Wastewater Treatment. *Clean Technologies*, 7(3), 57. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7030057>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., & Munaretto, S. (2022). Circular Economy of Water: Definition, Strategies and Challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2(4), 1463–1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Parvin, F., & Tareq, S. M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science*, 11(6), 100. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3>
- Pryatnasari, U., & Mursidah. (2024). Comparative Analysis of Hydroponic Farming Income between Pak Choy (*Brassica chinensis* L.) and Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 25(3), 93–98. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2024/v25i3596>
- Sandoval-Herazo, M., Martínez-Reséndiz, G., Fernández Echeverria, E., Fernández-Lambert, G., & Sandoval Herazo, L. C. (2021). Plant Biomass Production in Constructed Wetlands Treating Swine Wastewater in Tropical Climates. *Fermentation*, 7(4), 296. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040296>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2026, August 18). *Limón mexicano: sabor y salud en cada gota*. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/limon-mexicano-sabor-y-salud-en-cada-gota?utm_source=chatgpt.com
- Souza, V., Gimenes, R. M. T., de Almeida, M. G., Farinha, M. U. S., Bernardo, L. V. M., & Ruviano, C. F. (2023). Economic feasibility of adopting a hydroponics system on

- substrate in small rural properties. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(8), 2761–2775. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02529-9>
- USDA. (2023). *Citrus: World Markets and Trade*. Foreign Agricultural Service, United States Department of Agriculture.
- Villar-Luna, H., Santos-Cervantes, M. E., Rodríguez-Negrete, E. A., Méndez-Lozano, J., & Leyva-López, N. E. (2024). Economic and Social Impact of Huanglongbing on the Mexico Citrus Industry: A Review and Future Perspectives. *Horticulturae*, 10(5), 481. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050481>
- Viveros, J. A. F., Martínez-Reséndiz, G., Zurita, F., Marín-Muñiz, J. L., Méndez, M. C. L., Zamora, S., & Sandoval Herazo, L. C. (2022). Partially Saturated Vertical Constructed Wetlands and Free-Flow Vertical Constructed Wetlands for Pilot-Scale Municipal/Swine Wastewater Treatment Using *Heliconia latispatha*. *Water*, 14(23), 3860. <https://doi.org/10.3390/w14233860>
- Wada, O. Z., Ige, A. O., Egbewole, B. I., & Olawade, D. B. (2026). Circular economy from wastewater resource recovery: A review of recent advances and global disparities. *Sustainable Chemistry One World*, 9, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2026.100187>
- Wang, H. X., Xu, J. L., Sheng, L. X., & Liu, X. J. (2018). A Review of Research on Substrate Materials for Constructed Wetlands. *Materials Science Forum*, 913, 917–929. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.913.917>
- Wang, L., Ning, S., Zheng, W., Guo, J., Li, Y., Li, Y., Chen, X., Ben-Gal, A., & Wei, X. (2023). Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856>
- Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., & Zimbone, S. M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. *Waste Management*, 80, 252–273. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.024>

Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo prestado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para cursar la Maestría en Ciencias de la Ingeniería en el marco del programa de maestría del Tecnológico Superior de Misantla, incluido en el Registro Nacional de Programas de Posgrado de Excelencia.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

ACERCA DE LOS AUTORES

Aarón López Roldán

Pedagogo por la Universidad Veracruzana. Maestro en Desarrollo Regional Sustentable y Doctorante en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. Ha participado en proyectos orientados a los humedales de tratamiento y sobre lagunas dulceacuícolas, promoviendo acciones sobre educación ambiental, uso de inteligencia artificial generativa para la divulgación de la ciencia y trabajo comunitario sustentable. aaron.rolescolar@gmail.com

Aridai Rivas Hernández

Ingeniera Bioquímica por el Instituto Superior de Xalapa. Maestra en Desarrollo Regional Sustentable. Cuenta con una Especialización en Política y Derecho Ambiental y es doctorante en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. Miembro activo de la Alianza México sin Plásticos y autora de publicaciones sobre gestión de residuos, la Agenda 2030 y sustentabilidad. Promueve la educación y la participación comunitaria logrando un impacto positivo en la gestión de residuos y el desarrollo sostenible.

Brenda Suemy Trujillo-García

Ingeniera Industrial y doctorante en Ciencias de la Ingeniería por el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos ornamentales y soluciones basadas en la naturaleza. Su trabajo se centra en la evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes, la dinámica fisicoquímica del agua y la sostenibilidad de sistemas de saneamiento, contribuyendo al desarrollo de tecnologías ecológicas para la protección ambiental. 212t0022@itsm.edu.mx

Carlos Alberto Torres Balcázar

Profesor Investigador. Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Colaborador del Laboratorio de Tecnología del Agua DACBIOL-UJAT. Ha desarrollado y colaborado en más de 15 proyectos de investigación para el tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante lodos activados en reactores de mezcla completa continuos y discontinuos, filtros biológicos, humedales artificiales realizando pruebas con diferentes especies de plantas nativas en la zona del sureste mexicano, así como incineración de residuos sólidos. carlos.torres@ujat.mx

Clementina Barrera Bernal

Bióloga por la Universidad Veracruzana. Maestra en Ingeniería Ambiental y Doctora en Ciencias e Ingeniería (Línea ambiental) por la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. En 2008 obtuvo la medalla al mérito universitario por su doctorado. Su línea de investigación es sobre hidroclimatología, manejo integrado de cuenca y tecnologías del agua. cbarrera@uv.mx

David Reyes González

Docente en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla desde julio del 2017, Ingeniero Químico de formación, con Maestría y Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación enfocadas en el área de productividad de pozos petroleros y aseguramiento de flujo, soluciones a problemas asociados a los PRONACES y las ODS, a través de la caracterización de residuos de diferentes actividades comerciales e industriales, como materiales con valor agregado, para su incorporación a la cadena de valor productiva. SNII nivel I. dreyesg@itsm.edu.mx

David Guerrero Zarate

Profesor Investigador. Doctor en Ciencias en Ingeniería Química. Responsable del Laboratorio de Química Analítica, División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez UJAT. Sus intereses en investigación teórica se centran en la predicción de propiedades termodinámicas de los fluidos y equilibrio de fases, utilizando ecuaciones de estado no convencionales, así como el modelado de procesos químicos. En el trabajo experimental, se enfoca en la medición de propiedades volumétricas y de transporte en sustancias puras y mezclas de interés para las industrias química, energética y de alimentos. david.guerrero@ujat.mx

Diana Eliud Palacios Arriaga

Ingeniera Civil y Maestra en Gestión Ambiental por la Universidad Veracruzana, campus Xalapa. Cuenta con experiencia en proyectos de investigación y divulgación enfocados en la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para la gestión integral del agua. Su trayectoria profesional se orienta al diseño y desarrollo de infraestructura sustentable que integra criterios ambientales, sociales y técnicos para atender los desafíos del desarrollo urbano, promoviendo soluciones innovadoras, resilientes y sostenibles.

Elizabeth Delfín Portela

Doctora en Ciencias de la Ingeniería por El Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Maestra en Ingeniería Industrial

por el Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca e Ingeniera en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca. Líneas de investigación: humedales, economía circular y acuacultura sustentable. portela341@gmail.com

Erandy Saray Hernández Rivera

Ingeniero en Gestión Empresarial y estudiante de Maestría en Ciencias de la Ingeniería en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, adscrita a la línea de investigación “Optimización de Procesos para la Sustentabilidad Ambiental” del Laboratorio de Humedales y Sostenibilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación. 242t0504@itsm.edu.mx

Erick Arturo Betanzo Torres

Doctor en Desarrollo Regional Sustentable por El Colegio de Veracruz. Posdoctorado en Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Maestría en Ingeniería e Ingeniero Eléctrico en el Instituto Tecnológico de Orizaba. Líneas de investigación: acuacultura sustentable. SNII nivel I. eabetanzot@itsm.edu.mx

Georgina Martínez-Reséndiz

Doctora en Ciencias Ambientales, egresada de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Su línea de investigación se centra en la evaluación de la calidad del aire, identificación de biomarcadores asociados a los efectos de la contaminación atmosférica en la salud y ambiente. Así como al tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos para la remoción de contaminantes, la recuperación de ecosistemas acuáticos y la economía circular. Conjunta la ciencia, la tecnología y la educación ambiental para promover soluciones sostenibles frente a los actuales retos ambientales. SNII nivel C. georgina.martinez.tecm@gmail.com

Gerardo Lagunes Herrera

Ingeniero Ambiental por la Universidad Veracruzana (2018). Realizó su servicio social y Tesis de Licenciatura en la Red de manejo Biotecnología del Instituto de Ecología. gerardolagunes_06@hotmail.com

Gaspar López Ocaña

Profesor Investigador. Doctor en Ciencias en Ecología. Responsable del Laboratorio de Tecnología del Agua DACBIOL-UJAT. Ha incursionado en líneas de investigación y proyectos sobre: contaminación de suelo, modelación ambiental, restauración de suelos impactados por hidrocarburos, evaluación de impactos, riesgos y daños ambientales, restauración ecológica, monitoreo de calidad del aire,

calidad del agua, diseño de sistemas de potabilización y tratamientos de aguas residuales, disposición y tratamiento térmico de residuos sólidos, legislación y gestión ambiental. investigacion.dacbiol@ujat.mx

Graciela Elizabeth Nani González

Licenciada en Economía por la Universidad Veracruzana Maestra en ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca y Dra. en Ciencias de la Ingeniería por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Se desempeña como Docente de Tiempo Completo en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Premio Estatal de Divulgación científica por el Libro Mi Cartilla del Agua y ganadora del Premio Estatal a la Mujer en Veracruz 2023. genanir@itsm.edu.mx

Irma Zitácuaro Contreras

Licenciada en Ciencias atmosféricas por la Universidad Veracruzana. Maestra y Doctora en Desarrollo Regional Sustentable por El Colegio de Veracruz. Líneas de investigación: capital social, educación ambiental para la sustentabilidad, desarrollo rural y cultura del agua. SNII-C. irma.zitacuaro@gmail.com

Jazmín Alejandra Segovia Cano

Ingeniero industrial y Maestra en Ingeniería Industrial, por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Doctorante en Ciencias de la Ingeniería por el mismo Instituto. Ha participado en difusión de la ciencia con la temática del uso de humedales contruidos con plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales y trabaja sobre el aprovechamiento de los humedales contruidos para mejorar la calidad de guas de la industria nixtamalizadora. 242t0534@itsm.edu.mx

Joaquín Sangabriel-Lomelí

Ingeniero Civil y Dr. en Ingeniería Aplicada por la Universidad Veracruzana, campus Boca del Río. Ha participado en proyectos de investigación orientados al tratamiento de aguas residuales mediante humedales contruidos, modelación de procesos ambientales y sostenibilidad de sistemas de saneamiento. Su trabajo se enfoca en el desarrollo y evaluación de tecnologías ambientales aplicadas para la gestión sustentable de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente. jsangabriell@itsm.edu.mx

José Luis Marín Muñiz

Ingeniero Químico, Maestro en Ciencias Ambientales y Doctor en Ecología Tropical por la Universidad Veracruzana. Tiene un posdoctorado en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. Profesor-investigador de tiempo completo de

El Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Líneas de investigación: ingeniería ecológica, uso de ecotecnologías para mejorar la calidad ambiental y sus implicaciones socioambientales. Premio Estatal de Ciencia y Tecnología en el área de Biología y Química por el COVEICYDET en 2025. SNII nivel II. jlmarinm@itsm.edu.mx

Juan Antonio Pérez Sato

Ingeniero en Parasitología Agrícola por parte de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Maestro en Ciencias en Genética por el Colegio de Postgraduados, México. Doctor of Philosophy (PhD) por The University of Sheffield – Sheffield, UK. Profesor Investigador Adjunto de El Colegio de Postgraduados campus Córdoba, Veracruz, México. Área de investigación: Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales con potencial para el turismo rural, así como la planificación y restauración ecológica del paisaje. SNII-I. pantonio@colpos.mx

Luis Carlos Sandoval Herazo

Licenciado en ingeniería civil (Universidad de Sucre, Colombia), cuenta con dos maestrías, una en ingeniería (Instituto Tecnológico de San Andrés Tuxtla, México) y otra en desarrollo regional sustentable (El Colegio de Veracruz, México); tiene dos doctorados uno en desarrollo regional sustentable (El Colegio de Veracruz, México) y el otro en Ciencias de la Ingeniería (Tecnológico Nacional de México campus Orizaba). Fundador y presidente de la Asociación Latinoamérica de Desarrollo Sustentable y Energías Renovables A.C. Especializado en Medio Ambiente y Saneamiento mediante Humedales de Tratamiento y Procesos Ambientales. SNII nivel II (lcsandovalh@itsm.edu.mx).

María de la Asunción Gurruchaga Rodríguez

Doctora en Ciencias en Ingeniería Industrial y Maestra en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba. Ingeniera Química por la Universidad Veracruzana. SNII-C. eloisa.gr@orizaba.tecnm.mx

María Elizabeth Hernández Alarcón

Licenciada en Química Farmacéutica Biológica por la Universidad Veracruzana (1992), Maestra en Ciencias en Biotecnología por el Instituto Tecnológico de Veracruz (1997), Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad del Estado de Ohio, USA (2006). Investigador Titular B de la Red de Manejo Biotecnológico de Recursos del Instituto de Ecología donde ha desarrollado su carrera profesional por 30 años. Es miembro del SNI, Nivel 2, su línea de investigación es la Ingeniería Ecológica y Biogeoquímica de humedales. SNII nivel II. elizabeth.hernandez@incol.mx

Mayerlin Sandoval Herazo

Doctora en Ciencias de la Ingeniería/Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Profesora- investigadora y miembro del Laboratorio de humedales y sustentabilidad ambiental en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México. Especializada en medio ambiente y saneamiento ambiental mediante sistemas de tratamiento eco-tecnológicos, humedales de tratamiento y economía circular. SNII-C. mayerli.sandoval24@gmail.com

Nelson Andrés Losada Rodríguez

Contador Público por la Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia. Con estancia de investigación internacional en el Instituto de Investigaciones Jurídicas de la Universidad Veracruzana en 2019. Maestro en Desarrollo Regional Sustentable y doctorante en la misma línea por El Colegio de Veracruz, bajo la sublínea de investigación “Desarrollo Rural Sustentable”, enfocado en soluciones basadas en la naturaleza para el saneamiento del agua.

Raúl Castelán Cabañas

Maestro en Sociedades Sustentables por la Universidad Autónoma Metropolitana. Maestro en paisaje y Turismo Rural por el Colegio de Postgraduados. Experiencia de trabajo en programas de Sembrando Vida y sobre manejo del agua.

Roberto Rodríguez Bastarmérito

Profesor Investigador. Doctor en Ingeniería Civil. División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la UJAT. Es presidente de la Academia de Ingeniería Civil de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (2018-2023). Responsable del “Laboratorio de Análisis de Sedimentos de Potamología (L.A.S.P.)” y del Miembro de la Asociación Mexicana de Hidráulica, Reconocimiento de la Secretaría de Educación como Perfil Deseable de para profesores de tiempo completo “PRODEP” y miembro del Sistema Estatal de Investigadores.

Roselia Servín Juárez

Ingeniero Agrónomo especialista en Economía Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo. Maestra en Ciencias por el Colegio de Postgraduados. Doctora en Microfinanzas por Wageningen University & Research, Países Bajos (Holanda). Profesora Investigadora Titular de El Colegio de Postgraduados campus Córdoba, Veracruz, México. Sus investigaciones están relacionadas con las microfinanzas y la Economía del Desarrollo, Bancos comunitarios de ahorro y préstamo, la vulnerabilidad social, impacto de los servicios financieros en el bienestar de las

familias rurales de bajos ingresos y la comercialización de productos agroalimentarios. SNII-I. roseliasj@colpos.mx

Rudy Solís Silván.

Profesor Investigador. Doctor en Ciencias en Ecología. Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco. Capacitador externo en materia ambiental y seguridad en el trabajo N° de registro SOSR-810822-7L0-0005. Es Gestor ambiental para la elaboración de estudios ambientales. Obtuvo el primer lugar como asesor en el área de biotecnología y ciencias agropecuarias en el 6to. Encuentro de jóvenes hacia la investigación organizado por el CONACYT y Consorcio de Universidades Mexicanas con el tema “Bioelectricidad a partir del cultivo de *Anana comosus* (piña)” en 2018. rudy.solisilvan@gmail.com

Sergio Aurelio Zamora Castro

Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Sinaloa. Maestro en Mecánica de Suelos y Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería, Construcción y Hábitat. Universidad Veracruzana, Boca del Río, Ver., México. Su línea de investigación está enfocada a la ingeniería de suelos. SNII nivel I. szamora@uv.mx

Yulissa Rivas Hernández:

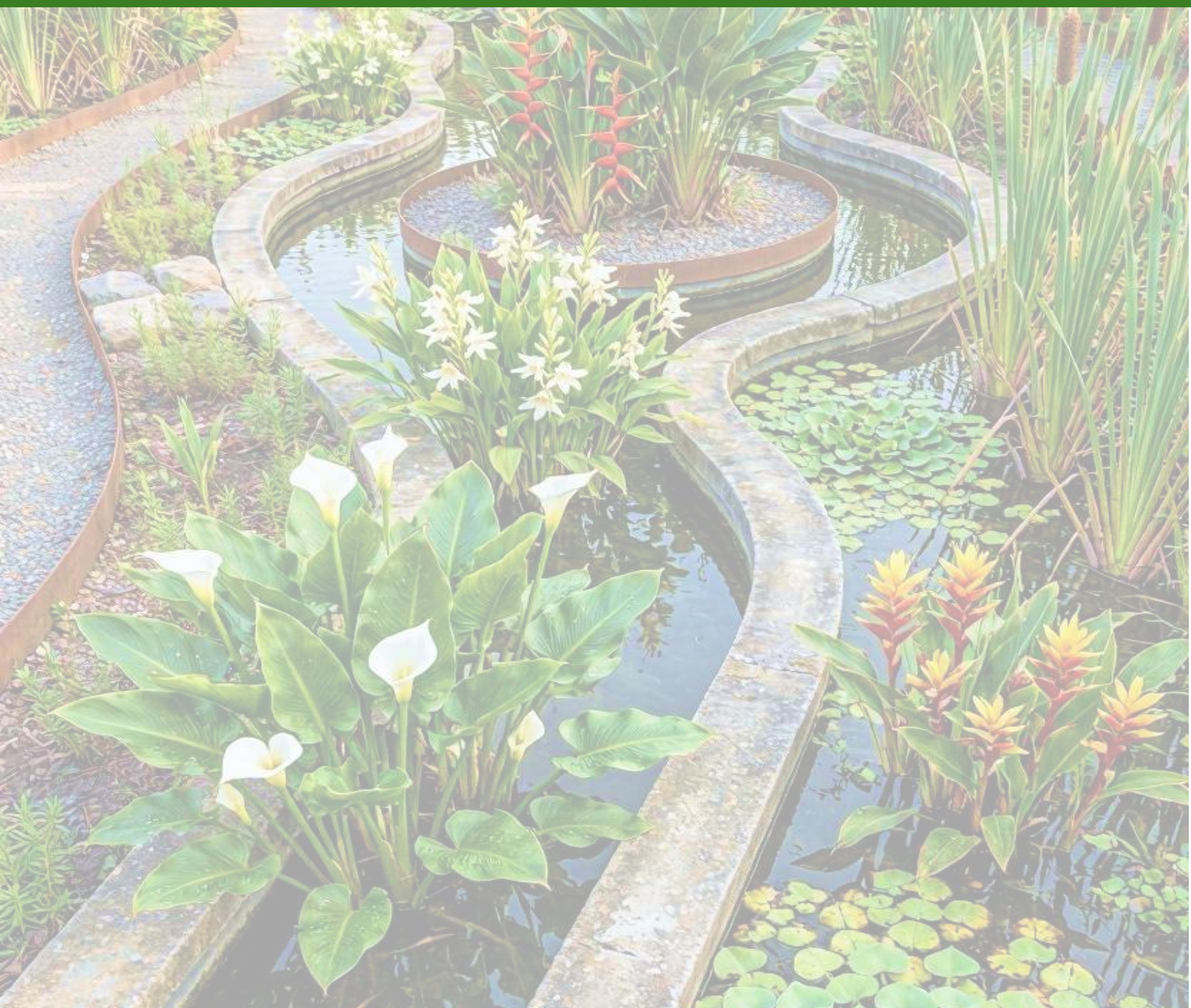
Licenciada en Relaciones Industriales por la Universidad Veracruzana. Con experiencia en Administración Pública y Turismo Rural. Maestra en Desarrollo Regional Sustentable por El Colegio de Veracruz, bajo la sublínea de investigación “Turismo Sustentable y Educación Ambiental”.

Los humedales de tratamiento y sus aportes socioambientales

José Luis Marín-Muñiz

Sergio Aurelio Zamora Castro

(editores)



Este libro aborda avances importantes en el tópico de los humedales construidos o de tratamiento. En el cual se manejan tres ejes básicos en los que se integran los diferentes capítulos. Los ejes incluyen la relación de la sociedad con los humedales construidos, análisis de los avances científicos respecto al tópico en el mundo y aplicaciones nacionales. Cada aporte refleja un avance importante en el campo de conocimiento, que será de apoyo o guía útil ante las necesidades de contaminación hídrica nacionales e internacionales.