



Recibido 04/04/2025
Aceptado 15/05/2025

Innovaciones en el diseño de humedales construidos para mejorar el tratamiento de aguas residuales

Claudia Lizeth Muñoz-Aguilar; José Luis Marín-Muñiz
Revista Ciencias de la Ingeniería Vol. 1, N°. 1. ISSN EN TRAMITE / Págs. 13 - 23
DOI: <https://doi.org/10.26359/UACAMCI.01021>

INNOVACIONES EN EL DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

INNOVATIONS IN CONSTRUCTED WETLAND DESIGN TO IMPROVE WASTEWATER TREATMENT

Claudia Lizeth Muñoz-Aguilar¹, José Luis Marín-Muñiz²

¹El Colegio de Veracruz, C. Carrillo Puerto 26, zona Centro, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.
Correo de autor de correspondencia: munozaguilarcl@gmail.com

RESUMEN

Los humedales construidos (HC) o humedales de tratamiento (HT) son ecotecnologías que con diseño ingenieril imitan los procesos físicos, químicos y biológicos de un humedal natural para remover los contaminantes presentes en las aguas residuales. Sin embargo, gracias a múltiples investigaciones se les pueden otorgar algunas características como bajo costo de construcción, operación y mantenimiento. Por ello, se convierten en una excelente opción para las zonas rurales, donde el desarrollo económico es menor con relación a una zona urbana. De acuerdo al flujo del agua, los HC han sido clasificados como sistemas superficiales o subsuperficiales, estos últimos debido a la entrada del agua en subsuperficiales verticales u horizontales; siendo los más utilizados. Con el fin de acelerar los procesos de remoción, se han probado nuevos diseños que incluyen adecuaciones para entrada de oxígeno, distribución de agua, uso de nuevas especies o combinación de sustratos, dichas adecuaciones convierten a estos sistemas en humedales de tratamiento intensificados (HTI). Debido a que aún se conoce muy poco sobre estas innovaciones y su aplicación en México es escasa, este estudio tuvo como objetivo analizar el uso de HC y los tipos de sistemas empleados, así como los avances tecnológicos en el diseño de HTI a través de técnicas de indagación documental y revisión bibliográfica. Donde se identificó que el sustrato, los microorganismos y la vegetación son los componentes más estudiados con el fin de eficientizar la depuración de aguas residuales de distinta procedencia. Además, se analizaron seis tipos de humedales (humedal superficial, subsuperficiales verticales y horizontales, aireados, verticales tipo francés y por pulsos), siendo China el país con más investigaciones en cada uno de ellos y Francia el país dominante en el humedal vertical tipo francés, quien fue implementado por primera vez en el año 2012, siendo la innovación más reciente hasta la actualidad.

PALABRAS CLAVE

Humedales de tratamiento, innovaciones, aguas residuales, diseño

ABSTRACT

Constructed wetlands (CW) or treatment wetlands (TW) are eco-technologies that, with engineering design, imitate the physical, chemical and biological processes of a natural wetland to remove contaminants present in wastewater. However, thanks to multiple investigations, they can be given some characteristics such as low construction, operation and maintenance costs. Therefore, they become an excellent option for rural areas, where economic development is lower in relation to an urban area. According to the water flow, CW have been classified as surface or subsurface systems, the latter due to the entry of water into vertical or horizontal subsurfaces. These being the most used. Currently, to accelerate the removal processes, new designs have been tested that include adaptations for oxygen entry, water distribution, use of new species or combination of substrates, said adaptations convert these systems into intensified treatment wetlands (ITW). Since very little is known about these innovations and their application in Mexico is scarce, this chapter aimed to analyse the most studied components of HC and the technological advances in the design of ITW through documentary research techniques and bibliographic review. Where it was identified that the substrate, microorganisms and vegetation are the most studied components to make the purification of wastewater from different sources more efficient. In addition, six types of wetlands were analysed (surface wetland, vertical and horizontal subsurface wetland, aerated, vertical French-type and pulsed), with China being the country with the most research in each of them and France being the dominant country in the French-type vertical wetland, which was implemented for the first time in 2012, being the most recent innovation to date.

KEYWORDS

Treatment wetlands, innovation, wastewater, design

INTRODUCCIÓN

Los humedales naturales son definidos como ecosistemas de transición entre ambientes terrestres y acuáticos, los cuales presentan una saturación temporal o permanente de agua y en ellos crece vegetación adaptada a condiciones de suelo anegadas, conocidos como suelos hídricos. Son zonas con un alto valor ambiental, pues aportan diversos servicios ecosistémicos como la regulación del clima, favorecen el régimen hidrológico de cuencas y son hábitat de múltiples especies [1,2]. Además, dichos ecosistemas llevan a cabo funciones relacionadas a la transformación, remoción y almacenamiento de nutrientes y materia orgánica presentes en aguas contaminadas, debido a la presencia de microorganismos y a la actividad fito-remediadora de las plantas. Por ello, desde hace algunos años se les otorgó el nombre de "riñones del planeta" [3]. Con el fin de simular los procesos que se llevan a cabo en estos medios naturales y lograr un beneficio entre el ambiente y los seres humanos, se desarrolló una tecnología basada en condiciones de diseño que replican la actividad de depuración y transformación llevada a cabo por un humedal natural, conociendo a estos sistemas como humedales construidos (HC) o humedales de tratamiento (HT) [4-6]. por ello se les conoce como una solución basada en la naturaleza.

Los HC son celdas o canales que pueden ser superficiales o subsuperficiales. Los últimos son rellenos por un medio filtrante o sustrato, donde se desarrollan biopelículas de microorganismos, además, sirve de anclaje para las raíces de la vegetación sembrada. Dichos sistemas presentan múltiples ventajas como sistemas alternativos de tratamiento para aguas residuales, ya que presentan altas remociones de contaminantes y a su vez bajos costos de construcción, operación y mantenimiento [7,8]. Por ello, a lo largo del tiempo han sido ampliamente estudiados [9-12], con el fin de mejorar los procesos de remoción y eficientizar estas tecnologías depuradoras. Y como resultado, actualmente se puede clasificar a los HC en dos tipos: HC convencionales e intensificados; estos últimos, presentando adecuaciones en sus condiciones de diseño con el fin de acelerar los procesos de remoción y con ello, la obtención de efluentes tratados que puedan reutilizarse, sobre todo, ante los problemas de escasez existente en los últimos años [13].

En México, el recurso hídrico ha sido reconocido como un asunto estratégico y de seguridad nacional, pues cumple un papel fundamental en políticas ambientales y económicas del país. Sin embargo, para poder seguir dándole dicho protagonismo, se requiere que los cuerpos de agua estén limpios, que no existan descargas de aguas contaminadas con compuestos que afecten su condición natural [14].



Además de considerar que, contar con agua de calidad es un derecho constitucional, como dicta el artículo 4º, párrafo 6, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, donde específicamente se menciona que “*toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos...*” [15]. Por esta razón, el Programa Nacional Hídrico 2020 – 2024 de México establece los objetivos, estrategias y acciones que aportan al desarrollo sustentable, definiendo al agua como un promotor de dicho desarrollo [16]; y, como bien lo menciona la publicación realizada en 1983 denominada Nuestro Futuro Común, mejor conocida como El Informe Brundtland, el desarrollo sustentable es aquel que busca cubrir las necesidades del presente, pero tomando en cuenta a las generaciones futuras para que puedan cubrir sus propias necesidades [17].

Con relación a lo anterior y de acuerdo con la establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el agua es el epicentro del desarrollo sustentable y un recurso fundamental para tener un desarrollo socioeconómico, y por supuesto, la supervivencia de los seres humanos [18]. Sin embargo, es importante destacar que debido al crecimiento poblacional, y al mayor consumo del agua en hogares, actividades agrícolas e industriales, se genera la necesidad de cubrir las demandas de este recurso para que todas las personas puedan satisfacer sus necesidades, por ello, dicho panorama genera una nueva problemática: la contaminación de los cuerpos de agua por la descarga de aguas residuales sin tratamiento, lo que perjudica el avance hacia el logro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible publicados por la Agenda 2030, específicamente el ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento [19].

Sumando a lo anterior, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), describe que las aguas residuales son aquellas compuestas por diferentes tipos de afluentes provenientes de las descargas municipales, comerciales, industriales, agropecuarias, de zonas habitacionales o de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas [20]. En México, dichas aguas son tratadas a través de los sistemas de tratamiento convencionales conocidos como Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), sin embargo, del 100% de las aguas residuales municipales colectadas solo se trataron el 66.7% en el año 2022, lo cual corresponde a 143.8 m3/s. Este tratamiento se llevó a cabo a través de las 2,774 PTAR que existen en el país. Cabe destacar que las aguas residuales municipales son vertidos domésticos, principalmente [21].

Es importante reconocer la carencia de estas infraestructuras depuradoras en comunidades rurales, donde existe una población no mayor a 2,500 habitantes, pero, principalmente su desarrollo económico y tecnológico es escaso [22]. Puesto que, la construcción de dichas plantas de tratamiento puede superar hasta los 5 millones de pesos mexicanos (\$5,000,000.00 M.N.), más un aproximado de 40 mil pesos mexicanos (\$40,000.00 M.N.) mensuales para su operación por metro cúbico [8]. Por ello, dichas comunidades no cuentan con el recurso necesario para poder costear un sistema de tratamiento convencional. Esta situación orilla a que las aguas residuales generadas en estas zonas sean vertidas directamente a cuerpos de agua naturales como lagunas, lagos, ríos, océanos, o incluso a cielo abierto, convirtiendo a estos vertederos en focos contaminantes y en espacios aptos para infecciones entre los seres humanos, afectando a su vez a la flora y la fauna que habita estos ecosistemas, así como generando malos olores y una vista indeseable [23]. Cabe destacar que, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda realizado por INEGI, en México existen 185,243 localidades rurales y se han reportado aproximadamente 48,000 comunidades que no cuentan con sistemas de tratamiento [7].

Ante esta carencia y el uso constante del recurso hídrico, a lo largo del tiempo se han desarrollado tecnologías ecológicas altamente eficientes y económicamente viables para impulsar el saneamiento de aguas contaminadas de manera alternativa en zonas rurales, entre estas tecnologías se encuentran los biodigestores, biofiltros, lavaderos ecológicos y los humedales construidos [23,24], siendo los intensificados los de aplicación actual. Cabe destacar que en México, uno de los principales problemas es la falta de infraestructura de saneamiento en zonas rurales, donde las aguas residuales suelen descargarse directamente en ríos y lagunas, generando contaminación y afectando la salud pública [25]. Los HC, pueden ser una solución accesible y de bajo costo para estas problemáticas, ofreciendo una depuración eficiente mediante procesos naturales.

Otro aspecto crítico es la contaminación de cuerpos de agua por actividad industrial y agrícola, ya que sustancias como metales pesados y nutrientes derivados de fertilizantes han deteriorado la calidad de fuentes hídricas en estados como Sonora y Guanajuato [26]. En estos casos, dichos sistemas alternativos han demostrado su capacidad para reducir la presencia de contaminantes y mejorar la calidad del agua. Finalmente, el manejo de aguas pluviales en entornos urbanos representa un desafío ante las recurrentes inundaciones en ciudades mexicanas, agravadas por la falta de infraestructura verde que facilite la absorción y recarga de agueros [10]. La implementación de HC en zonas urbanas puede mitigar efectos, mejorando la gestión hídrica y promoviendo un enfoque sostenible de drenaje urbano. Estos ejemplos evidencian la importancia de los HC como una solución basada en la naturaleza, capaz de abordar problemáticas actuales de saneamiento, restauración ambiental y resiliencia hídrica en México.

Debido a que aún se desconoce a profundidad estas innovaciones y su aplicación en México es escasa, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los avances tecnológicos en el diseño de humedales construidos para mejorar el tratamiento de dichas aguas. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: primero, describir la importancia de los humedales construidos, tipos y sus componentes; segundo, construir una línea del tiempo respecto al uso de humedales construidos; para así, como tercer paso, analizar los avances respecto a los cambios de diseño del uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada fue de tipo cualitativo. Para ello, se utilizaron técnicas tanto de indagación documental como de revisión bibliográfica, el diseño utilizado no fue experimental, y su alcance fue descriptivo con un tamaño de muestra no probabilístico [27]. La Figura 1 presenta el proceso metodológico, el cual se realizó en 4 fases principales.

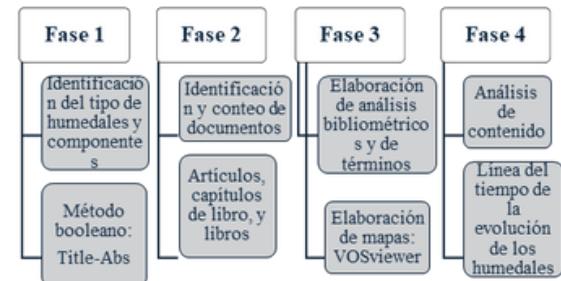


Figura 1. Diseño metodológico

Fase 1: Como primera fase se llevó a cabo una búsqueda de literatura en la plataforma de información científica DIMENSIONS. Dicha exploración se realizó utilizando el método booleano TITLE-ABS, con el fin de limitar la búsqueda de las palabras clave únicamente en el título y resumen de los documentos encontrados (28). La búsqueda se realizó en dos apartados, el primero de ellos fue con el fin de conocer los componentes más estudiados en los humedales construidos. Y, el segundo apartado se realizó para identificar a los países que han desarrollado mayor investigación de humedales convencionales (humedal superficial, humedal de flujo subsuperficial horizontal y humedal de flujo subsuperficial vertical) y humedales intensificados (humedales aireados, humedales por pulso o flujo mareal y humedales de flujo vertical tipo francés). Las palabras clave utilizadas para el apartado uno fueron: (“Constructed wetlands” OR “Artificial wetlands” OR “Treatment wetlands”), en dicha búsqueda no se especificó el periodo y fue un análisis “FULL DATA”, ya que se pretendía conocer los términos más utilizados desde las publicaciones más antiguas. Y, por último, las palabras clave utilizadas para el apartado dos fueron: (“Surface flow constructed wetland” OR “Free water surface constructed wetland”); (“Horizontal subsurface flow constructed wetland”); (“Vertical subsurface flow constructed wetland”); (“sequential feeding constructed wetland”); (“pulse flow constructed wetland” OR “tidal flow constructed wetland”); (“constructed wetland” OR “artificial wetland” AND “aeration”), estableciendo como periodo de búsqueda 2010 – 2024.

Fase 2: Se realizó un conteo del tipo de documentos encontrados en la plataforma DIMENSIONS, haciendo uso únicamente de artículos, capítulos de libro y libros.

Fase 3: Una vez realizada la búsqueda, se exportaron las bases de datos en un archivo CVS para realizar un mapa de términos con el programa VOSviewer versión 1.6.20, con la finalidad de hacer un análisis de co-ocurrencia, para identificar cuáles son las palabras más utilizadas en el tema de humedales construidos y así corroborar los componentes de estas ecotecnologías (29). Asimismo, se realizaron mapas bibliométricos y un acoplamiento bibliográfico por países para identificar qué países son los que están trabajando con los diferentes tipos de humedales construidos (28).

Fase 4: Finalmente, se realizó un análisis de contenido de la literatura, con el fin de desarrollar una línea del tiempo que permitiera plasmar la evolución que han presentado los humedales construidos desde sus primeras aplicaciones hasta la actualidad.

RESULTADOS

3.1. IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

El ambiente es un pilar importante dentro del desarrollo sustentable, pero no el único [30], pues la sustentabilidad va más allá del cuidado y preservación de los recursos naturales; también está íntimamente relacionada a la solución de problemas sociales y su relación con el eje económico y ambiental de una comunidad en particular [31]. Ejemplo de ello, es la problemática existente de las aguas residuales sin tratamiento, ya que este tipo de efluentes cuenta con altas cantidades de contaminantes, impactando negativamente a los ecosistemas acuáticos que fungen como receptores de estas aguas contaminadas [5], además de que están relacionadas con enfermedades de transmisión hídrica [23]. De aquí parte la importancia de los humedales construidos.

En México y gran parte de América Latina, la mayor cantidad de aguas residuales tratadas son de áreas urbanas [32]. No obstante, si todas las comunidades buscan entrar a un esquema de sustentabilidad es necesario que incluyan procesos de remoción de contaminantes de sus aguas para así, generar menos impacto al ambiente [33]. Y, sin duda alguna, los humedales construidos se han convertido en una tecnología sostenible, ya que son sistemas amigables con el medio ambiente, económicamente viables tanto en construcción, operación como mantenimiento y, gracias a los procesos físicos, químicos y biológicos desarrollados en el sistema cuentan con altos porcentajes de remoción [24]. Asimismo, este tipo de sistemas de tratamiento de acuerdo con [13], son descritos con una característica importante: robustos, es decir, que el rendimiento de dichos humedales es poco susceptible a cambios de carga y concentración de contaminantes en las aguas residuales. Otra de las características fundamentales de este tipo de sistemas, y que han elevado su interés de investigación y uso, es su eficiencia para depurar diversos tipos de aguas como domésticas, municipales, agrícolas e industriales. Además, pueden ser implementados como tratamientos secundarios o terciarios, dentro de un proceso de depuración para mejores resultados de remoción [13,32]. Gracias a estas características se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas a los componentes más importantes de los humedales.

3.2. COMPONENTES DE LOS HUMEDALES

Al aplicar la metodología descrita anteriormente e introducir las palabras clave en DIMENSIONS para la fase 1 y 2, e identificar los componentes más estudiados de estas ecotecnologías, se obtuvieron 98,634 publicaciones en un periodo de 1964 al 2024. Dichas publicaciones se clasificaron en artículos (79,755 ejemplares), capítulos de libro (15,655) y libros (3,224). Los artículos de investigación son el tipo de documento que predomina más en la búsqueda de información acerca de los humedales construidos.

Una vez obtenida la base de datos, se procedió a realizar la fase 3, donde se llevó a cabo un análisis de co-ocurrencia; obteniendo un mapa representado en la Figura 2 basado en la distancia, es decir, muestra la distancia de los elementos reflejando la fuerza de relación entre ellos. Dicho mapa representa la frecuencia de uso de cada palabra a través de diferentes clústeres por color. [29].

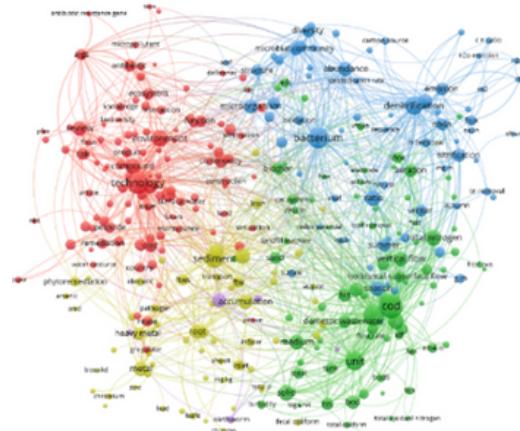


Figura 2. Mapa de co-ocurrencia de términos

En la figura se observan cuatro grandes grupos relacionados entre sí, pero cada uno con su término dominante: TECHNOLOGY o tecnología (color rojo), WASTEWATER o aguas residuales (color verde), SEDIMENT o sedimento (color amarillo), y BACTERIUM o bacterias (color azul), las palabras mencionadas son los nodos de mayor tamaño, lo que indica que son términos con mayor influencia dentro del tema de los trabajos publicados sobre HC. Si se corrobora lo obtenido en la Figura 2 con la literatura existente, se observa que son términos comunes dentro de las investigaciones de este ámbito. Pues de acuerdo con algunos autores [5,24,34], definen a los humedales construidos como tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Y, de acuerdo con Johann Beckmann quien fue un promotor de dicho concepto, explica que la tecnología es una ciencia que procesa lo natural para crear bienes o servicios y satisfacer necesidades de la sociedad, ya que facilita la explicación y solución de problemas [35]. Esto se aplica totalmente en los humedales construidos, pues son conocimientos científicos nacidos de la ingeniería ecológica aplicados con el fin de simular procesos naturales para darle tratamiento a las aguas contaminadas, integrando a la sociedad para lograr un beneficio mutuo entre el ambiente y los seres humanos [4,36].

Como segundo término se encuentra el de aguas residuales (WASTEWATER), puesto que son ecotecnologías que pueden tratar aguas contaminadas de diferente procedencia, se han utilizado para depurar aguas del sector industrial [37,38], el sector agrícola [39], porcícola [40] y municipal [41], entre otros. Además, para algunos autores las aguas residuales se pueden considerar como parte de los componentes de los humedales [42].

Los siguientes dos términos dominantes dentro del análisis fueron SEDIMENT y BACTERIUM. De acuerdo con algunos autores, los componentes más estudiados de estas tecnologías son el sustrato (SEDIMENT), los microorganismos (BACTERIUM), y la vegetación [32,43].

El sustrato es uno de los elementos con mayor investigación, puesto que su función no solo es actuar de soporte para las plantas sino, que actúan como medio filtrante y fungo como hábitat para el desarrollo de microorganismos. Los materiales más estudiados destacan por su porosidad, ejemplo de ellos son la arena, grava o roca, tezontle o zeolita [24]. De acuerdo con las investigaciones más relevantes sobre el sustrato son con el fin de conocer cual material y tamaño son más eficiente para remover sustancias contaminantes [44].

Además, en los últimos años se han investigado materiales de polietileno tereftalato (botellas PET), utilizando las partes rugosas o con dobleces y las taparroscas, esto debido a la gran facilidad de obtención y con el fin de dar un segundo uso a dicho material que normalmente termina en un relleno sanitario o en los océanos [45,46]. Asimismo, el utilizar sustratos específicos mejora la retención de los contaminantes y, por ende, mejora la remoción de estos. Por ello, el estudiar algún material en particular para remover un contaminante objetivo, da lugar a los humedales intensificados, ejemplo de ello es el uso de materiales reactivos para la eliminación del fósforo como, por ejemplo, productos naturales, subproductos industriales y manufacturados ricos en Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Aluminio (Al) [13].

Los microorganismos corresponden a uno de los componentes más importantes dentro de los HC, gracias a que son los principales encargados de realizar tratamientos biológicos, junto con las plantas. De acuerdo con la cantidad de oxígeno presente en el humedal se desarrollan dos tipos; la zona superior que presenta mayor cantidad por el contacto con la atmósfera y por los exudados de las raíces es habitada por microorganismos aerobios y, el resto del sustrato presenta microorganismos anaerobios, ya que hay una cantidad menor o nula de oxígeno [11,42]. Los principales procesos realizados por estos organismos son: la eliminación de nutrientes, elementos traza, degradación de materia orgánica y desinfección [10]. De acuerdo con la gran variedad de especies que pueden adaptarse a estos sistemas, se han desarrollado diferentes estudios para caracterizar cuales microorganismos se encuentran presentes en la depuración de las aguas residuales. Algunos ejemplos incluyen a bacterias, hongos y protozoarios [47,48].

En relación con lo presentado en la Figura 2, la vegetación no fue identificada con un nodo de gran tamaño, sino que fue relacionada dentro del grupo referente al sustrato, esto debido a que las plantas se encuentran ancladas a este. Sin embargo, a pesar de que este término faltó dentro del análisis, cabe destacar que las plantas son uno de los componentes más importantes en estos sistemas de tratamiento, pues gracias a su capacidad de transferir oxígeno a través de su tejido arenquimoso hacia su sistema de raíces (rizosfera), ayudan al desarrollo de microhabitats aerobios, donde la presencia de microorganismos de este tipo, favorecerán procesos necesarios para la mitigación contaminantes dentro del humedal [42]. Además, mediante las raíces, la vegetación realiza procesos de adsorción y absorción de minerales como metales pesados, fósforo y nitrógeno; y, compuestos derivados del consumo de medicamentos, o de productos químicos usados en el aseo personal y del hogar, estos últimos presentes en aguas residuales municipales y catalogados actualmente como contaminantes emergentes [32]. Por ello han sido estudiadas en gran medida desde plantas típicas de humedales como Phragmites spp., Typha spp., y Schoenoplectus spp. [5], hasta plantas ornamentales terrestres como Zantedeschia eathiopica [49,50], Canna spp. [5], Anturium spp. [51] y Heliconias spp., [49], las cuales han sido adaptadas a condiciones de HC. Destacando que México es el país con mayor aplicación de HC con vegetación ornamental [36]. Dichas investigaciones recomiendan el uso de este tipo de plantas, ya que mejoran el paisaje del sistema por su apariencia estética con flores, además pueden otorgar beneficios económicos debido a la comercialización de dichas flores [5] o en la elaboración de artesanías a partir de tejido de plantas que se siembran en estos humedales [52].

3.3. TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los resultados obtenidos en la fase 1 del apartado dos, con el fin de conocer los principales países que realizan investigaciones sobre los tipos de humedales construidos, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Identificación de documentos con el método booleano

Tipo de humedal	Artículos	Capítulos de Libro	Libros
Humbral superficial	495	12	0
Humbral superficial de flujo horizontal	510	31	0
Humbral superficial de flujo vertical	147	5	0
Humbral de flujo mareal	107	0	0
Humbral de tratamiento aireado	429	28	1
Humbral vertical tipo francés	22	1	0

Como se puede observar, la mayor cantidad de documentos encontrados en cada uno de los tipos de humedales son artículos de investigación, especialmente en los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, con un total de 510 artículos. Además, se observa que el humedal vertical tipo francés es quien tuvo menos trabajos de investigación del 2010 al 2014, pues únicamente se encontraron 22 artículos, más 1 capítulo de libro, siendo un total de 23 publicaciones. Y, el único libro encontrado fue referente a los humedales de tratamiento aireados.

Posteriormente, para la realización de la fase 3, se realizaron los análisis bibliométricos, con el fin de conocer cuáles son los países que presentan mayor número de investigaciones de cada uno de los seis tipos de humedales construidos. Obteniendo los resultados de la Figura 3.

Como se puede observar en la Figura 3, se muestran los principales países que han desarrollado investigaciones relacionadas a los diferentes tipos de humedales existentes en el periodo de 2010 al 2024, así como las colaboraciones entre ellos. De acuerdo con lo presentado en la figura, China es el país que más aporte ha tenido en investigaciones a excepción del humedal construido tipo francés (f).

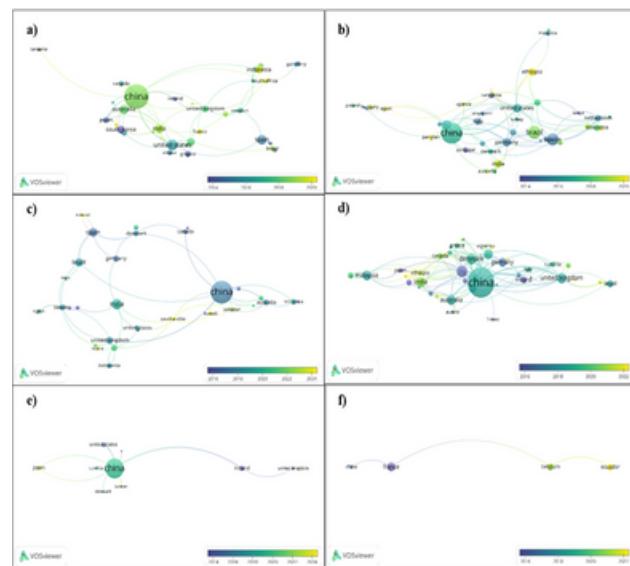


Figura 3. Mapas bibliométricos de países, a) humedal superficial, b) humedal superficial horizontal, c) humedal subsuperficial vertical, d) humedal de tratamiento aireado, e) humedal flujo mareal y f) humedal vertical tipo francés

Referente a los de flujo superficial (a) cuenta con un 32.3% de publicaciones a partir del año 2016, seguido de Estados Unidos con un 6.3% del total y Australia con un 4.5%. En investigaciones de humedales subsuperficiales horizontales (b), el país asiático sigue siendo el principal investigador con un total de 143 publicaciones correspondientes a un 26.4% en el año 2016, seguido de Brasil con 9.7%, quien realizó sus investigaciones a partir del año 2018 y, finalmente España con 8.3% quien ha tenido su mayor número de investigaciones desde el 2014.

Para humedales subsuperficiales verticales (c), China cuenta con el 38.8% de publicaciones desde el 2016. El mayor número de investigaciones de humedales con tecnologías intensificadas como los de tratamiento aireado (d) se desarrollaron a partir del 2018 también en China, quien tiene el 44.9% del total de publicaciones, asimismo, India es el país que ha realizado trabajos más recientes, a partir del 2022. Y finalmente, en humedales por pulsos (e) China sigue siendo líder, donde se observó el 78.5% de análisis, a partir del 2018. Sin embargo, el humedal de flujo vertical tipo francés (f) como su nombre lo indica, ha surgido en Francia, por ello es el país con mayor número de publicaciones, las cuales corresponden a un 21.7% del total desde el 2016, seguido de Bélgica y Ecuador con un 13.0%, en donde dichas investigaciones se han ejecutado principalmente a partir del 2020 y 2022 respectivamente. Este tipo de sistemas ademá de ser similares a un humedal de flujo vertical cuentan con un diseño francés que consiste en colocar una primera etapa de filtros alimentados con aguas residuales sin tratar, permitiendo un proceso de nitrificación completa [53].

De acuerdo con la revisión documental realizada, se pudo encontrar que el uso de los humedales construidos ha sufrido un cambio durante la última década. Estos cambios se han implementado específicamente en el diseño y estrategias operativas [13]. Debido a estos avances, actualmente se pueden clasificar en dos tipos (Figura 4): humedales convencionales, quienes realizan un tratamiento pasivo y a su vez se dividen de acuerdo con el flujo del agua a tratar (de flujo superficial y subsuperficial); y los humedales intensificados, estos tienen como objetivo la obtención de estándares de calidad de agua más altos. Esta nueva clasificación de humedales también se divide en dos: por el uso de energía externa o sustratos específicos para eliminar principalmente el fósforo [32], ya que es un elemento poco removido en los humedales de tipo convencional, con porcentajes del 44 al 71.6%. Cabe destacar que su remoción se asocia al sustrato [2,54,55].

El diseño de los HC toma en cuenta principalmente variables hidráulicas y cinéticas que integran tanto a variables hidrodinámicas como al comportamiento de los microorganismos, vegetación y su adaptación al medio filtrante. Así como la carga de contaminantes a tratar [6].

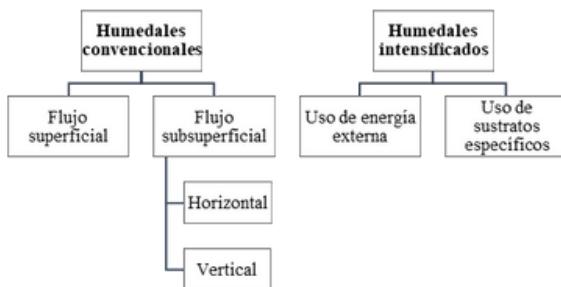


Figura 4. Clasificación actual de los humedales construidos. Elaboración propia

3.3.1. HUMEDALES SUPERFICIALES

Son sistemas de tratamiento conocidos como humedales de flujo superficial (FS) o flujo libre. Se asemejan lo más posible a un humedal natural [42]. Estos sistemas consisten básicamente en estanques o canales con una profundidad relativamente baja de 0.5 a 1 metro. El agua circula a través de los tallos de las plantas y se encuentra en contacto directo con la atmósfera [56]. La vegetación utilizada es de tipo acuática, puede ser flotante, emergente o sumergida (Figura 5).

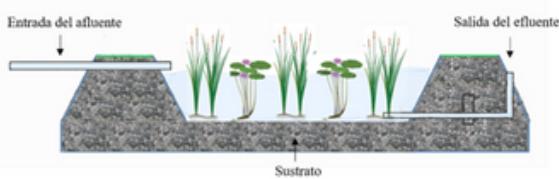


Figura 5. Humedal de flujo superficial. Elaboración propia

Dichos sistemas son eficientes, sin embargo, su combinación con otras tecnologías de depuración podría aumentar sus porcentajes de remoción, ya que de acuerdo a lo reportado en un estudio publicado en el 2018 [57], donde se evaluó la eficiencia de un humedal de FS utilizando *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis* en Perú, el cual pretendía corroborar el cumplimiento del agua tratada con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente en dicho país, con el fin de reutilizar el agua para riego. De acuerdo con el análisis se obtuvieron remociones del 84% para DBO, 89% para Coliformes Totales y Termotolerantes, 3% en pH y 77% para turbidez. Sin embargo, a pesar de que la mayoría de las remociones fueron de un 70 a casi 90%, dichos parámetros no dieron cumplimiento con los ECA. Por lo que se recomendó utilizar otro sistema de tratamiento posterior al humedal para lograr un cumplimiento a dichos estándares, así como también aumentar el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) del humedal.

3.3.2. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES

Los humedales de flujo subsuperficial (HFSS) se caracterizan por tener una circulación de agua subterránea a través del sustrato, la cual está en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de estos sistemas varía entre los 0.45 a 1 metro. El agua que ingresa a estos humedales se da a través de los caudales de escorrentía, agua subterránea, precipitaciones y de las descargas específicas a tratar [56]. Los actores principales en la remoción de dichos contaminantes son los microorganismos que crecen adheridos al sustrato, quien funge como filtro; y a las raíces de las plantas, donde estas llevan a cabo procesos de absorción y adsorción de contaminantes [42,56]. El sustrato puede estar conformado por diferentes materiales como grava, roca, sedimentos o restos de vegetación acumulados debido al crecimiento biológico [58]. Cabe destacar que el tamaño del medio poroso influye directamente en el flujo hidráulico y por ende en el caudal del agua a tratar [6]. Por ello, la determinación de la variación de los caudales es un parámetro importante que considerar en el diseño de estos sistemas, donde se toma en cuenta variables como: Q quien representa el caudal del afluente, E la evapotranspiración, P la precipitación, As el área superficial, H la altura del humedal, L la longitud del humedal y W el ancho del humedal.

Asimismo, Mitsch y Gosselink [3], proponen una fórmula mencionada en la Ec. 1 para determinar el caudal de entrada al sistema, la cual considera variables como tiempo de retención hidráulica (TRH). Dicha variable se refiere al tiempo que tarda el agua desde que entra y sale del sistema; y el volumen de agua a tratar. Dicho volumen hace referencia al espacio para agua que queda, descontando el espacio del medio poroso:

$$TRH = \frac{(Vm^3)}{Q(m^3 \div hr)} \rightarrow Q = \frac{V}{TRH} \quad (1)$$

El modelo implementado para el diseño consiste básicamente en un flujo de tipo pistón. Este tipo de flujo es considerado como el más básico, y con él se busca que la velocidad sea uniforme, es decir, todas las partículas del fluido desde la entrada hasta la salida deben tener la misma velocidad [59]. Buscando que el flujo rompa la resistencia creada por las plantas, raíces, sedimentos y sólidos acumulados. Por ello, para poder lograr una energía que rompa dicha resistencia se le proporciona al humedal una pendiente (comúnmente al 1 o 2%) con una salida de altura variable. Por ello, para el diseño de este tipo de sistemas, es importante considerar criterios como: reactores biológicos, flujo de pistón, y leyes que expliquen sobre el flujo a través de medios porosos como la ley de Darcy [42]. Los HFSS pueden ser utilizados para tratar eficientemente aguas residuales domésticas, industriales o lixiviados [60]. Y, se clasifican de acuerdo con el flujo o movimiento del agua en dos tipos: horizontales y verticales [3].

3.3.3. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES HORIZONTALES

Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (FSSH) se caracterizan principalmente porque el flujo del agua es de manera horizontal a través del sustrato poroso. Es decir, ingresa en la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo en la parte opuesta inferior tal cual como se presenta en la Figura 6.

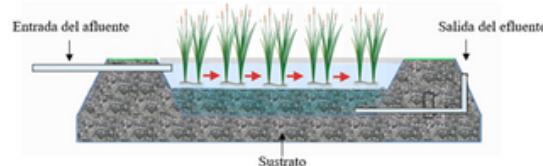


Figura 6. Humedal del flujo subsuperficial horizontal. Elaboración propia

El diseño de estos sistemas se basa en una cama impermeable con un sustrato de tierra o arena y grava, plantado con vegetación [42]. El agua se trata a través de su recorrido de manera lateral por todo el sistema. La profundidad del humedal varía entre 0.45 a 1 metro y cuenta con una pendiente entre 0.5 a 1%, con cargas orgánicas aproximadas de 6 g DBO5/m2d [6]. Cabe destacar que el agua residual que ingresa al sistema debe mantener un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del caudal de entrada [61].

Los criterios de diseño para los HFSSH son: cálculos del área del sistema, profundidad, pendiente, información sobre la porosidad del sustrato y relación largo-ancho [42].

Un ejemplo de la eficiencia de este tipo de sistemas fue reportado en 2021, donde se evaluó un humedal FSSH para tratar aguas pertenecientes a un colegio rural ubicado en el Municipio de San Juan de Pasto en el Departamento de Nariño, dicho sistema cuenta con una capacidad de 700 personas (personal administrativo, alumnos y docentes) y fue evaluado como un sistema de tratamiento secundario posterior a una trampa de grasa. El humedal de FSSH tuvo un TRH de 1.3 días, y fue sembrado con *Scirpus californicus* (juncos o totora). Los parámetros evaluados con las remociones obtenidas fueron las siguientes: 93.89% para DBO5, 84.98% de DQO, 40% de SST, 99.9% en Coliformes Totales y 99.97% para E. Coli, dichos porcentajes comprueban que el agua obtenida después del tratamiento es apta para descargarla en cuerpos naturales o reutilizarla para fines agrícolas, según las normas establecidas en Colombia. Además, el presente estudio corrobora la eficiencia de tratamiento de estos sistemas, y reafirma la viabilidad de implementación en zonas rurales gracias a las altas remociones, además de sus ventajas operativas y económicas [62].

3.3.4. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES VERTICALES

Los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (FSSV) fueron inicialmente desarrollados en Europa como alternativa a los humedales de FSSH para producir efluentes nitrificados [9]. Los humedales de FSSV son alimentados de manera intermitente para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias, a través de una tubería perforada colocada encima del sustrato. Recibiendo las aguas residuales de arriba hacia abajo, como regadera. El cual se muestra en la Figura 7. De esta forma, las condiciones de saturación con el agua en el sistema son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. La profundidad del medio granular es de entre 0.5 y 0.8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m²·día [56]. Las aguas infiltran verticalmente a través del sustrato y se recogen en una tubería situada en el fondo del humedal. La vegetación emergente se planta también en este medio granular. A diferencia del HFSSH, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo, para favorecer el drenado y evitar saturación [6].

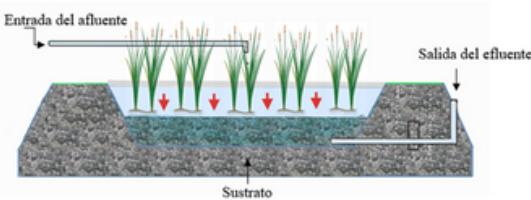


Figura 7. Humedal del flujo subsuperficial vertical. Elaboración propia

Para su diseño se debe considerar la construcción de dos humedales para que la operación sea de forma paralela, es decir, cada humedal debe tener un periodo de reposo y un periodo de suministro de agua, ya que son sistemas que operan con cargas superiores a los horizontales [63]. El periodo de reposo a considerar es 1 a 2, refiriéndose a que, por cada periodo de alimentación, se tengan dos periodos de reposo [42]. Esta manera de operación favorece la oxigenación del sustrato pues, la lámina de agua suministrada al sistema empujará el aire a través de los poros del sustrato; una vez que el agua sale totalmente del humedal, el espacio vacío formado se llenará con aire, el cual se arrastra en la siguiente aplicación. Cabe destacar que los criterios de diseño a considerar son los mismos que en un humedal FSSH.

En 2020, Sandoval-Herazo et al., (2020), evaluaron la eficiencia de remoción de humedales verticales parcialmente saturados en el tratamiento de aguas generadas en una granja porcina. Para ello, se adecuaron 6 unidades experimentales alimentados cada 4 horas, en dicho estudio se analizaron parámetros como DQO, SST, N-NH4, NTK, y CF totales.

Una vez realizadas las mediciones y cálculos necesarios se obtuvieron remociones del 5% para DQO, 20% de SST, 25% de N-NH4, 32% de NTK y 20% de CF totales, cabe destacar que dicho humedal fue plantado con especies vegetales como Canna hybrids e Iris germanica, las cuales demostraron tener una eliminación efectiva de contaminantes, así como importante resistencia a las aguas porcinas. Concluyendo que los humedales de FSSV son eficientes para tratar este tipo de afluentes, debido a las condiciones de saturación parcial que generan condiciones aerobias y anaerobias, favoreciendo los procesos de nitrificación y desnitrificación [40].

3.3.5. HUMEDALES DE TRATAMIENTO AIREADOS

Los humedales de tratamiento aireados (HTA) corresponden a los sistemas de humedales intensificados (13). Pueden ser de flujo horizontal o vertical. Este tipo de sistemas permiten una mayor eliminación de contaminantes, tienen la capacidad de remover entre 10 y 100 veces más la materia orgánica que un humedal convencional, gracias a la mayor disponibilidad de oxígeno (12). Dicho sistema es aireado de manera mecánica desde la parte inferior a través de un sistema de distribución de aire (64)(Figura 8).

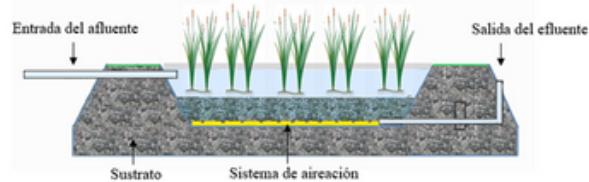


Figura 8. Humedal de tratamiento aireado. Elaboración propia

Los HTA se han implementado en gran medida en Reino Unido, pues más de 40 sistemas de humedales aireados de flujo horizontal han operado exitosamente como tratamientos terciarios. Su interés de uso se ha elevado considerablemente gracias a investigaciones que han corroborado su eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales de diferente procedencia como industriales (33), lixiviados de vertederos (65), escorrentía de deshielo de aeropuertos (66), aguas mineras (67) y aguas contaminadas por derrames de petróleo (68), entre otras.

El diseño de estos sistemas es similar a los humedales de flujo subsuperficial, con un sustrato conformado por grava y con profundidades saturadas al menos de 1 m. El agua residual entra al sistema de forma regulada a través de una tubería de alimentación y se mantiene por debajo del sustrato, aproximadamente entre 5 y 10 cm por debajo (13).

De acuerdo con algunos autores (69,70), los HTA tanto horizontales como verticales son altamente eficientes en la remoción de carbono y amonio, además eliminan nitrógeno total (NT) en mayores cantidades que los humedales subsuperficiales convencionales. Sin embargo, el utilizar la aireación de manera intermitente favorece la eliminación de NT en humedales aireados de flujo vertical.

En el 2020, se desarrolló una investigación con el fin de evaluar el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria atunera en Ecuador, a través de un humedal artificial aireado. Dicho sistema fue sembrado con 3 especies vegetales, las cuales correspondieron a *Chrysopogon zizanioides* (pasto vetiver), *Saccharomyces cerevisiae* y *Trichoderma harzianum*. Para poder evaluar cual era la especie más eficiente en la remoción de contaminantes, se establecieron 3 tratamientos (pasto vetiver + *S. cerevisiae*; pasto vetiver + *T. harzianum*; y, por último, pasto vetiver + *S. cerevisiae* + *T. harzianum*), los tres tratamientos se compararon con una celda control (sin vegetación) y una celda con puro pasto vetiver. Todos los experimentos tuvieron un total de 15 especies y un caudal de aire correspondiente a 3 l/min. De acuerdo con los análisis realizados, se pudo concluir que el tratamiento que contenía las especies de vetiver + *S. cerevisiae*, fue el sistema con mayores porcentajes de remoción, obteniendo 99.78% para DBO, 71.27% de NTK. Comprobando que el sistema de aireación proporciona condiciones óptimas para una mayor remoción de materia orgánica y nitrógeno.

3.3.6. HUMEDAL POR PULSOS O FLUJO MAREAL

Estos sistemas son conocidos como humedales de alimentación secuencial, humedales con flujo por pulsos (llenado-vaciado) o humedales de flujo mareal (HFM). Los HFM consisten en dos o más celdas de humedales de flujo subsuperficial acopladas, es decir en serie, tal y como se muestra en la Figura 9. Las cuales se llenan y se drenan de manera periódica y alternada por medio de bombas de aire (71). La alimentación secuencial hace referencia al llenado y vaciado alternativo de las celdas, mientras que el flujo por pulsos se configura en pares o en serie.



Figura 9. Humedal del flujo mareal. Elaboración propia

El objetivo principal de la alimentación secuencial es para aumentar la cantidad de oxígeno subsuperficial, y así tener mayores remociones de compuestos que necesitan oxígeno como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO5) y Nitrógeno amoniacal (13). Para ello se requiere un diseño adecuado, pues durante la etapa de drenado del agua, el aire entra por todo el sustrato y la superficie del agua, siendo su difusión de manera rápida. Durante la segunda etapa, se realiza el llenado posterior, donde la película de agua superficial del sustrato se encuentra cubierta de agua en condiciones anaerobias y anóxicas, prevaleciendo las condiciones reductoras. Durante todo el ciclo se crean condiciones únicas que permiten la proliferación de diversos microorganismos (72).

Debido a la tecnología implementada, son sistemas adecuados para tratar aguas residuales complejas, pues han demostrado altas remociones de contaminantes (73,74). Sin embargo, presentan altos costos de inversión, operación y mantenimiento por el uso de bombas y componentes necesarios para trasladar el agua de una celda a otra. Por ello, los HFM a pequeña escala presentan altos costos de implementación, no obstante, a escala real son una opción tecnológica rentable, comparados con sistemas convencionales (75). Además, si existe una descarga de aguas residuales permanente, se debe considerar el uso de amplios contenedores y sedimentadores para resguardar el agua antes de alimentar el sistema de humedales. Esto mientras se mantiene el drenado en las celdas.

En 2022, se realizó una comparación del rendimiento de humedales artificiales mareales y no mareales, los cuales trataban aguas residuales de la maricultura (76). En dicho estudio se pretendía eliminar principalmente el nitrógeno y fósforo, a través del uso de *Aegiceras corniculatum* (manglar típico). En cuanto a los resultados para estos dos compuestos inorgánicos, indicaron que las tasas de remoción son superiores en los humedales de flujo subsuperficial sin marea a comparación de los humedales superficiales con y sin marea. Los porcentajes de remoción obtenidos para el humedal de FSS no mareal fueron 88.4% de NO₂, 80.5% de NO₃, 81.4% de NH₄⁺, 79.7% de Nitrógeno Total (NT) y 40.8% de Fósforo Total (TP), asimismo, las remociones para el humedal de flujo superficial mareal fueron 65.3, 61.3, 90.6, 60.1 y 19.2%, respectivamente. Dichos resultados fueron comparados entre sí, y a la par, con las remociones obtenidas para el humedal de flujo superficial no mareal, el cual obtuvo las siguientes remociones: 11.4, 64.6, 68.7, 56.6 y 16.3%. Dichos porcentajes indicaron que los humedales de FSS no mareales son más estables y efectivos en su actividad depuradora para aguas marinas en comparación con los humedales de flujo libre mareales y no mareales. Así mismo, Wu y colaboradores (73), evaluaron un HC a escala piloto con flujo mareal, principalmente para observar la transferencia de oxígeno, eliminación de materia orgánica y amonio. De acuerdo con los resultados expuestos, los HC con flujo mareal mejoraron significativamente el suministro de oxígeno y la eliminación de DBO5 y NH₄⁺, sin embargo, el contar con altas cargas de DBO, esto provocó una inhibición en los procesos de nitrificación, debido al crecimiento desmedido de las bacterias heterotróficas (microorganismos que usan los compuestos orgánicos para crecer).

3.3.7. HUMEDAL VERTICAL TIPO FRANCÉS

El humedal de flujo vertical tipo francés (HT-FV francés) representado en la Figura 10, es un sistema de tratamiento originado en Francia, el cual tiene como propósito tratar aguas residuales crudas a través de dos etapas consecutivas de humedales verticales convencionales con distintos sustratos (13,77). Su diseño específico permite tratar las aguas después de pasar por una reja. En la primera etapa, denominada lecho de carrizos francés, se lleva a cabo el tratamiento de los lodos, retención de sólidos y eliminación parcial de materia orgánica y nitrificación. La capa retenida en la superficie debe retirarse cuando alcance la profundidad máxima (20 cm), dicha capacidad es alcanzada en un periodo de 10 a 15 años. Posteriormente, en la segunda etapa se lleva a cabo la eliminación de la materia orgánica y procesos de nitrificación en mayor medida, a través de un humedal vertical convencional, asimismo, dicho humedal puede ser sustituido por otro sistema si se busca potenciar algún otro proceso de remoción (77).

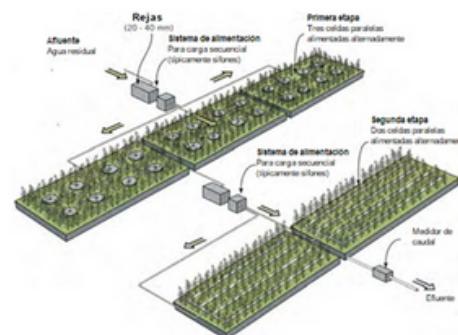


Figura 10. Humedal vertical tipo francés [13]

El diseño del HT-FV francés se caracteriza por su simplicidad. Pues no existe otra unidad de tratamiento más que las mallas y los filtros. Un punto importante dentro del correcto funcionamiento del sistema es la buena colocación de las plantas, las cuales consisten únicamente en carrizos (*Phragmites sp.*). Los filtros de la primera etapa son de gran utilidad para remover materia orgánica y Sólidos Suspensos Totales (SST), los filtros de la segunda etapa se utilizan con el fin de pulir la DQO, DBO5 y SST. El sustrato utilizado en todo el sistema tiene diferentes dimensiones con el fin de proporcionar las condiciones adecuadas para un buen tratamiento. En la etapa uno, se suele colocar grava de 2 a 6 mm. Cabe destacar que el agua en este punto es recogida por un sistema de tuberías en la parte inferior del sistema, donde se encuentra la grava de mayor tamaño (20 – 60 mm) para evitar obstrucciones. En la etapa dos, el sustrato más utilizado es la arena (13). Las celdas son construidas con relación al largo y ancho de la superficie de uno, con una pendiente del 1%. La profundidad de la capa principal se establecerá de acuerdo con el rendimiento deseado, pues la mayor parte de la eliminación de carbono y amonio en los HT-FV francés se produce dentro de los 10 a 40 cm superiores de un filtro insaturado. Cuando se deben alcanzar concentraciones estrictas de efluentes, se puede aumentar la profundidad de la capa principal (> 60 cm para la eliminación de DQO y > 80 cm cuando se requiere una nitrificación completa) (78).

En 2019, se realizó una evaluación de un HC tipo francés a escala piloto en la Universidad de Paula Santander-Ocaña, Colombia, el cual trataba aguas residuales porcinas, dicho sistema utilizaba *Typha latifolia* (Totora), y evaluó la remoción de contaminantes en dos TRH, 10.5 días y 7 días. Los porcentajes obtenidos para 10.5 días fueron: 98.43% para DQO, 90.0 % de DBO5 y 99.0 % para SST%; y, las remociones para el TRH de 7 días: 91.02%, 76.09% y 90.0% respectivamente. Dichos resultados demostraron que el HT-FV francés a escala piloto obtuvo mejores resultados con un mayor TRH, por ello, dicho sistema es recomendado para el tratamiento de aguas porcinas, sin embargo, recomendado su implementación en otros sectores para corroborar su eficiencia depurativa (79).

No obstante, cabe destacar que dicho sistema al igual que los demás ha sido estudiado en los últimos años con el fin de generar nuevos diseños. Esto genera una nueva oportunidad para centros de investigación, industrias o diferentes establecimientos públicos y privados que tienen como objetivo reducir los costos y mejorar el rendimiento de estas ecotecnologías para el tratamiento de aguas residuales (53).

3.4. HUMEDALES CONSTRUIDOS A TRAVÉS DEL TIEMPO

Desde hace más de tres décadas se les adjudicó el término "riñones del planeta" a los humedales naturales, debido a las actividades de desinfección y transformación de materia orgánica y otros nutrientes (80). Cabe destacar que el uso de estos sistemas no es nuevo, pues se han realizado reportes donde se registra el uso de humedales naturales desde civilizaciones antiguas, en los cuales China y Egipto utilizaban estos sistemas para disponer de sus aguas servidas (81). Sin embargo, el utilizar estos sistemas como descarga de aguas residuales de manera descontrolada provocó la pérdida de ecosistemas húmedos. En la década de los 50's se produjo un cambio radical en el uso de los humedales naturales como sitios de descarga, debido al basto conocimiento que se generó sobre sus servicios ecosistémicos. Por ello, se comenzó a investigar acerca de nuevas tecnologías que imitaran los procesos de los humedales naturales, generando la idea de los HC (2).

La evolución sobre los HC a través del tiempo se puede dividir en tres etapas, la primera etapa comprende un periodo acerca de los primeros humedales construidos desde 1950 a 1970; la segunda etapa se centra en un periodo de 1980 a 1990; y, por último, del año 2000 a la actualidad.

La Figura 11 presenta una línea del tiempo adaptado de una publicación de Vidal y Hormozábal en el 2018 (2), presentando los hechos más relevantes en la historia de los HC.

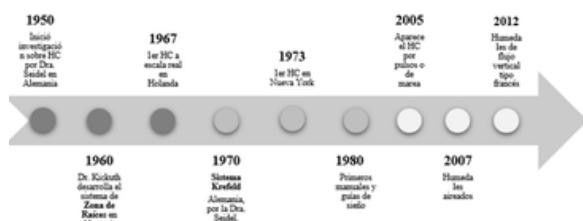


Figura 11. Evolución de los humedales construidos (adaptado de Vidal y Hormozábal, 2018) [2]. Elaboración propia

3.4.1. PERÍODO DE 1950 A 1970

Uno de los trabajos más antiguos sobre estos sistemas fue presentado en una carta elaborada por Nemo en 1904, quien observó por primera vez que las aguas domésticas podían tratarse en un jardín, mediante canales con una profundidad aproximada de 0.381 a 0.457 m y con la presencia de plantas que podían desarrollarse en lugares inundados (81,82). Pero fue hasta los 50's donde comenzaron los primeros trabajos científicos sobre plantas capaces de remover contaminantes. En 1952 la Dra. Käthe Seidel en el instituto de Max Planck, Alemania, realizó experimentos en jardinerías donde obtuvo remociones de fenoles, metales pesados e hidrocarburos presentes en aguas contaminadas, especialmente con *Schoenoplectus* spp. (juncos), donde se confirmó que dicha planta no solo enriquecía el sustrato, sino que exudaban antibióticos (2). Posteriormente en 1960, dicha pionera trabajó en colaboración con el Dr. Kickuth de la Universidad de Göttingen, Alemania. Posterior a su separación, éste desarrolló un sistema llamado "Método de Zona de Raíces", el cual básicamente consistió en la investigación sobre el funcionamiento de las plantas en humedales con flujo horizontal, con un sustrato específico y con la especie *Phragmites australis* (carrizo), dichos trabajos se centraron en el análisis de la transferencia de oxígeno por medio de su sistema de raíces, así como su aporte de carbono hacia las bacterias, procesos de nitrificación y desnitrificación, así como la precipitación de fósforo (2,83). Debido a las múltiples investigaciones sobre los HC de FS que se estaban desarrollando hasta el momento, en 1967 se construyó el primer HC a escala real en Lelystad, Países Bajos para 6,000 personas, y un año más tarde en Keszthely, Hungría, ambos para tratar aguas servidas. Cabe destacar que las investigaciones sobre humedales en Alemania solo se limitaron al método de zona de raíces, mientras que en Estados Unidos se experimentaba sobre flujos subterráneos (84). Sin embargo, fue hasta 1973 cuando se diseñó y construyó el primer humedal de FS como sistema piloto en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, Nueva York (85). Las investigaciones realizadas por la Dra. Seidel dieron como resultado un sistema conocido como "Sistema Krefeld" en 1970. Dicho sistema consistía en humedales en paralelo, conocidos como lecho de filtración (84), con varias etapas y vegetación emergente. En este modelo se solía utilizar un humedal de FSSV en las primeras etapas, y posteriormente un humedal de FSSH. Estos experimentos dieron base a lo en el siglo XX se denominarían humedales híbridos (85).

2.4.2. PERÍODO DE 1980 A 1990

Como resultado de los diferentes experimentos, la aplicación de los HC comenzó a expandirse, implementando dichos sistemas en California, Dinamarca, Reino Unido, Portugal, España, Grecia e Italia (2). Por ello, a finales de 1980 se crearon las primeras guías y manuales con relación al diseño y construcción de estas ecotecnologías (86-89).

2.4.3. PERÍODO DEL 2000 A LA ACTUALIDAD

De acuerdo con Vidal y Hormozábal, a partir del año 2000 las investigaciones referentes a los HC crecieron en gran medida (2). Y, un dato más actual se representa en la tabla 1, donde los resultados obtenidos para investigaciones de humedales construidos en la plataforma de información científica DIMENSIONS fue de 98,634 en total.

Asimismo, se ha podido observar que dichos sistemas han sido investigados desde distintos enfoques, tomando en cuenta principalmente sus componentes. Sin embargo, uno de los eventos más significativos en la evolución de los humedales construidos ha sido la generación de nuevos diseños con el fin de obtener un tratamiento más eficiente de las aguas residuales, creando la clasificación de humedales intensificados (13). De acuerdo con lo presentado en la Figura 12, y la búsqueda de información en DIMENSIONS, el primer artículo publicado sobre el humedal tipo mareal fue en el año de 2005 (90), el cual se centró en un experimento basado en mejorar la eliminación de la materia orgánica y nitrógeno amoniacal. Posteriormente, en el 2007 se publicó el primer artículo sobre humedal de tratamiento aireado (65), el cual pretendía mostrar la eficiencia de remoción a escala piloto en lixiviados de un vertedero. Y, por último, siendo el humedal de más reciente creación el humedal originado en Francia en el año 2012 (91).

3.5. AVANCES TECNOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los avances tecnológicos de los humedales construidos básicamente consisten en el diseño y condiciones operativas (6). Dichos sistemas presentan tecnologías avanzadas para pasar de las remociones que proporciona un humedal convencional a generar altos porcentajes de remoción a través de los humedales intensificados, los cuales hacen uso de estrategias operativas, de diseño y/o materiales específicos para remover principalmente fósforo, nitrógeno y materia orgánica. Dichos avances se basan principalmente en el uso de medios reactivos, recirculaciones, saturaciones parciales, alimentación secuencial y sistemas de aireación forzada (13). Los medios reactivos suelen utilizarse como sustituto del sustrato convencional (arena, grava o piedra porosa), con el fin de eliminar el fósforo o retener temporalmente el amonio. Debido a que la eliminación del fósforo está íntimamente relacionada con propiedades fisicoquímicas e hidrológicas del medio filtrante, ya que este se encarga de absorberlo o precipitarlo (55). Ejemplo de sustratos específicos son los medios naturales como la apatita, arena de conchas, conchas de ostras calentadas o quemadas; subproductos industriales, como cenizas volantes y escorias; o productos manufacturados como Ferrosorp®, LECA®, phosclean®, entre otros, siempre y cuando tengan altas concentraciones de Ca, Fe y Al (92). Una de las desventajas de este tipo de sustratos es el aumento considerable del pH del agua tratada y la colmatación que puede sufrir el sustrato en un largo tiempo por la precipitación del fósforo, ya que se reducen los poros (13). La recirculación y la saturación parcial son dos formas de aumentar la eliminación del nitrógeno total (NT) y materia orgánica en los humedales verticales. La recirculación consiste en direccionar una parte del efluente (agua tratada con alta cantidad de nitrato, pero poca materia orgánica) al afluente (agua contaminada con bajo nitrato y alta materia orgánica) permitiendo que se lleve a cabo procesos de desnitrificación gracias a las composiciones de los dos tipos de aguas (93). Asimismo, la saturación parcial consiste en mantener la capa superior de la celda del humedal de FV sin agua y la capa inferior con agua, al no contar con agua la primera parte del sistema favorecerá las condiciones aerobias desarrollando procesos de nitrificación (13). Otras de las estrategias operativas es la alimentación secuencial, la cual se lleva a cabo en el humedal de tipo mareal (71) y los sistemas de aireación activa o aireación forzada, donde se coloca una bomba de aire a través de una tubería en la parte inferior del humedal, permitiendo la distribución de las burbujas por todo el sustrato con el fin de eliminar en mayor proporción el carbono, amonio y NT (13,64).



CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, los humedales construidos presentan diversas características que elevan su importancia e interés de uso, ya que son sistemas altamente estudiados para tratar aguas residuales de diferente procedencia como, aguas industriales, municipales, domésticas, agrícolas, entre otras. Por ende, han sido investigados a través del tiempo, especialmente sus componentes principales como el sustrato, los microorganismos y la vegetación; con el objetivo de mejorar los procesos de remoción de contaminantes y generando un nuevo tipo de humedales construidos desarrollados a partir del año 2000: los humedales de tratamiento intensificado (humedales aireados, de flujo mareal y vertical tipo francés). Dichos sistemas se caracterizan por utilizar energía externa o sustratos específicos para eliminar contaminantes como el fósforo, amonio y materia orgánica, principalmente. Asimismo, se pudo detectar que China es el país con mayor investigación sobre humedales construidos tanto convencionales como intensificados, a excepción del humedal vertical tipo francés que, como su nombre lo indica, fue originado en Francia, por lo que dicho país es el principal investigador sobre este humedal. Además, se identificó que los principales avances tecnológico en el diseño de esta nueva clasificación de humedales consiste en el uso de tecnologías específicas como bombas de recirculación, tuberías de aireación, o estrategias operativas como alimentaciones secuenciales, uso de medios reactivos como sustrato y saturaciones parciales. Dichos métodos son con el fin de eliminar los componentes que no suelen removese en grandes cantidades en los humedales convencionales. Sin embargo, la presencia de sus componentes y la circulación del agua son aspectos que permanecen igual desde 1950, año en el que iniciaron las investigaciones científicas sobre este tema.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de El Colegio de Veracruz, por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Desarrollo Regional Sustentable, perteneciente al Sistema Nacional de Posgrados de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SNP-SECIHTI). Asimismo, agradezco a SECIHTI por el financiamiento del Proyecto de posgrado con número de **CVU 1324929**.

Además, agradezco a mis directores del proyecto por su confianza y apoyo.

REFERENCIAS

1. Arias O. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial [Tesis]. [Barcelona]: Universidad de Cataluña; 2004.
2. Nivala J. Effect of desing on treatment performance, plant nutrition and clogging in subsurface flow treatment wetlands. [Aarhus, Denmark]: Aarhus University; 2012.
3. Dotro Gabriela, Langergraber Guenter, Molle Pascal, Nivala J, Puigagut J, Stein O, et al. Humedales para Tratamiento. Vera-Puerto I, Arias C, editors. Vol. 7. IWA Publishing; 2021. 1-177 p.
4. De la Peña ME, Ducci J, Zamora V. Tratamiento de aguas residuales en México. México: BID; 2013. 1-42 p.
5. Secretaría de Gobernación. DECRETO de 2012 por el cual se declara reformado el párrafo quinto y se adiciona un párrafo sexto al artículo 4o. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. [Internet]. DOF. 8 de febrero México; 2012. Available from: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5232952&fecha=08/02/2012#gsc.tab=0
6. CONAGUA. Programa Nacional Hídrico 2020 - 2024 [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 5]. Available from: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>
7. Ramírez A, Sánchez JM, García A. El Desarrollo Sustentable: Interpretación y Análisis. Revista del Centro de Investigación. 2003 Apr;6(21):55-9.
8. ONU. Agua | Naciones Unidas [Internet]. 2023 [cited 2024 Nov 5]. Available from: <https://www.un.org/es/global-issues/water>
9. ONU. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. 2023.
10. SEMARNAT, INECC. Mitigación del cambio climático. Ciudad de México; 2018 Nov.
11. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2023. México; 2023.
12. INEGI. Población Rural y Urbana [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 5]. Available from: https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P
13. Vidal-Alvarez M. Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable. 2018 Oct 10;3(I-2):41-58.
14. Marín-Muñiz JL. Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. Agro Productividad [Internet]. 2017 [cited 2024 Nov 5];10(5). Available from: <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1028>
15. SEMARNAT. Los humedales en México. 2014.
16. CONAGUA. NumeraguA 2022 [Internet]. 2022. Available from: www.gob.mx/conagua
17. Hernández-Sampieri R, Fernández C, Baptista P. Metodología de la Investigación. 6th ed. McGraw Hill; 2014. 1-634 p.
18. Zitácuaro-Contreras I, Ortega G, Marín-Muñiz JL. Análisis de la educación a nivel primaria basada en la ética y su relación con el medio ambiente y la sustentabilidad. In: Noceda DA, editor. Rostros de la postmodernidad: crisis ambiental y alternativas de desarrollo sustentable en México. 1st ed. El Colegio de Puebla, A. C.; 2024.
19. Sarmiento EG, Roa Perez J, Ortiz-Ospino L. Análisis de las tecnologías en sistemas de abastecimiento de agua potable. Investigación y Desarrollo en TIC [Internet]. 2019 Jul 1;10(2):32-44. Available from: <http://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identic>
20. Rillo AG. Análisis hermenéutico de la relación entre desarrollo sostenible y competencias profesionales del médico general mexicano. Foro de Educación. 2015 Jul;13(19):263-93.
21. Quiroz MR, Sierra AB. Pertinencia de las ANP como política de conservación y mejoramiento de la calidad de vida. Análisis de percepción en la Reserva de la Biosfera de Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. Estudios Sociales: Revista de Investigación Científica. 2008;16(32):141-76.
22. Zurita-Martínez F, Sandoval-Herazo LC. La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Tendencias en energías renovables y sustentabilidad [Internet]. 2024 Oct 26;3(I):6-10. Available from: <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/186>
23. González-Pereyra D, Cisneros-Almazán R, Cisneros-Pérez R, Guadiana-Alvarado ZA, Soto-Peña GA. Tratamiento de aguas residuales de la industria galvanoplástica mediante humedales intensificados a nivel microcosmos. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación, desarrollo y práctica. 2022 Dec 6;15(3):1080-94.

34. Pérez YA, García Cortés DA, Jauregui Haza UJ. Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*. 2022 Apr;26(1):2279.
35. Carvajal G. Sobre el discurso tecnológico de la modernidad. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*. 2012 Aug;18(25):37-59.
36. Marín-Muñiz JL, Hernández ME, Gallegos-Pérez MP, Amaya-Tejeda SI. Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecol Eng*. 2020 Mar;151:47.
37. Guerra-Sandoval BG. Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de productos lácteos San Salvador - Cantón Riobamba, mediante fitoremedición con humedales artificiales empleando totora. [Riobamba-Ecuador]: Universidad Nacional de Chimborazo; 2018.
38. Sierra-Gaviria E, Campos-Gilón A, Daza-Ordoñez A, Coral P, Gómez L, Morantes CF, et al. Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales construidos en la remoción de mercurio de efluentes mineros auríferos. *Hidrobiologica*. 2024 Mar;15;34(1):51-9.
39. García Hernández J, Valdés-Casillas C, Cadena-Cárdenas L, Romero-Hernández S, Silva-Mendizábal S, González-Pérez G, et al. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas. *Rev Mex De Cienc Agric* [Internet]. 2011;1(1):97-111. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.ox?id=263120987008>
40. Sandoval-Herazo M, Nani G, Sandoval L, Rivera S, Fernández-Lambert G, Alvarado-Lassman A. Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2020 Mar;19;23(38):1-12.
41. Portillo-Peralta JI, Marín-Muñiz JL, Celis M del C, Zamora-Castro SA. Diagnóstico sobre el funcionamiento y la apropiación social de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales en pastorías. *Journal of Basic Sciences* [Internet]. 2022;8(23):162-9. Available from: <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
42. Delgadillo O, Camacho A, Pérez LF, Andrade M. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. *Antequera Durán N*, editor. Vol. 1. Bolivia: Centro AGUA; 2010. 1-115 p.
43. Delgadillo O, Camacho A, Serie MA. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales [Internet]. 2010. 115 p. Available from: http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
44. Pidre JR. Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal [Tesis doctoral]. [Cádiz, España]: Universidad de Cádiz; 2010.
45. López JE, Marín-Muñiz JL, Zamora-Castro SA, Celis M del C. Evaluación del crecimiento de plantas sembradas en humedal artificial: efecto del posicionamiento de sembrado. *Journal of Basic Sciences* [Internet]. 2022;8(23):104-11. Available from: <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
46. Andrade VA, Rosero JA. Evaluación de la remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto como tratamiento de pulimiento en las aguas residuales de Frigovito S.A. [Tesis de especialidad]. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2018.
47. Salgado I, Cruz M, Durán M del C, Oviedo R, Carballo ME, Martínez A. Bacterias como herramientas potenciales en el mejoramiento de humedales artificiales para el tratamiento de aguas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 2010;41:1-10.
48. Reyes-Ibarguen DE, Torres-González C. Caracterización de hongos antagonistas de tres humedales subsuperficiales utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*. 2011;10:21-30.
49. Zurita F, de Anda J, Belmont MA. Performance of Laboratory-Scale Wetlands Planted with Tropical Ornamental Plants to Treat Domestic Wastewater. *Water Quality Research Journal*. 2006 Nov;1;41(4):410-7.
50. Hernández ME, Galindo-Zetina M, Juan Carlos HH. Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. *Ecol Eng*. 2018 Apr;114:88-95.
51. Sandoval-Herazo L, Alvarado-Lassman A, Marín-Muñiz J, Méndez-Contreras J, Zamora-Castro SA. Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*. 2018 May;16;10(5):1594.
52. Zitácuaro-Contreras I, Vidal-Alvarez M, Hernández y Orduña MG, Zamora-Castro SA, Betanzo-Torres EA, Marín-Muñiz JL, et al. Environmental, Economic, and Social Potentialities of Ornamental Vegetation Cultivated in Constructed Wetlands of Mexico. *Sustainability*. 2021 Jun 1;13(11):6267.
53. Molle P. French vertical flow constructed wetlands: a need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*. 2014 Jan 1;69(1):106-12.
54. Boyás TA, Alvarez-Hernández LM, Marín-Muñiz JL, Celis-Pérez M del C, Zamora-Castro SA, Landa MG. Condiciones ambientales para el óptimo desarrollo de plantas ornamentales y fitoremediadoras. *Journal of Basic Sciences*. 2022;8(23):96-103.
55. Vohla C, Köv M, Bavor HJ, Chazarenc F, Mander Ü. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecol Eng*. 2011 Jan;37(1):70-89.
56. García-Serrano J, Corzo-Hernández A. Depuración con Humedales Construidos. España; 2008 Nov.
57. Torres Guerra JD, Magno Vargas JS, Pineda Aguirre RR, Cruz Huaranga MA. Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies Cyperus Papyrus y Phragmites Australis, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. 2018 Feb 6;3(2).
58. Plaza de los Reyes C, Vera L, Salvato M, Borin M, Vidal G. Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales. *Tecno Agua*. 2011;31:41-9.
59. Kosonen R, Zhou B. Reactor de lecho fluidizado. In: Shaofen L, editor. *Ingeniería de reacción*. Butterworth-Heinemann; 2016. p. 369-403.
60. Reynolds K. Tratamiento de las aguas residuales en latinoamérica. *Aqua Latin*. 2002;12:1-4.
61. Pérez-López ME. Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango [Tesis de Doctorado]. [Chihuahua]: Centro de Investigación de Materiales Avanzados, S. C.; 2009.
62. Cabrera PAM, Ojeda CA. Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para tratar los efluentes de un colegio rural en Colombia / Eficiência de uma área úmida de fluxo subsuperficial horizontal para tratar efluentes de uma escola rural na Colômbia. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*. 2021 Jul 30;4(3):3488-99.
63. Hernández-Ruiz JM, Pérez-Villar MM, Domínguez ER, Cachaldora IJ. Humedal subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales: diseño, construcción y evaluación. *Revista Cubana de Química*. 2012;24(2):1-8.
64. Rizzo A. Humedales Aireados. In: Arias CA, Vera-Puerto IL, Rodríguez T, editors. *Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales*. IWA PUBLISHING; 2023. p. 177-91.
65. Nivala J, Hoos MB, Cross C, Wallace S, Parkin G. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*. 2007 Jul;380(1-3):19-27.
66. Murphy C, Wallace S, Knight R, Cooper D, Sellers T. Treatment performance of an aerated constructed wetland treating glycol from de-icing operations at a UK airport. *Ecol Eng*. 2015 Jul;80:117-24.
67. Higgins JP, Hurd S, Weil C. The use of engineered wetlands to treat recalcitrant wastewaters. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2000 Sep;35(8):1309-34.
68. Wallace S, Kadlec R. BTEX degradation in a cold-climate wetland system. *Water Science & Technology*. 2005;51(9):165-71.
69. Foladori P, Ruaben J, Ortigara ARC. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater. *Bioresour Technol*. 2013 Dec;149:398-405.
70. Fan J, Liang S, Zhang B, Zhang J. Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013 Apr 2;20(4):2448-55.



71. Behrends LL. Humedales para tratamiento de alimentación secuencial (flujo por pulsos). In: Arias CA, Vera-Puerto IL, Rodríguez T, editors. Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales. IWA PUBLISHER; 2023. p. 199–207.
72. Green M, Friedler E, Ruskol Y, Safrai I. Investigation of alternative method for nitrification in constructed wetlands. *Water Science and Technology*. 1997;35(5):63–70.
73. Wu S, Zhang D, Austin D, Dong R, Pang C. Evaluation of a lab-scale tidal flow constructed wetland performance: Oxygen transfer capacity, organic matter and ammonium removal. *Ecol Eng*. 2011 Nov;37(11):1789–95.
74. Austin D. Influence of cation exchange capacity (CEC) in a tidal flow, flood and drain wastewater treatment wetland. *Ecol Eng*. 2006 Nov;28(1):35–43.
75. Austin D, Nivala J. Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetlands. *Ecol Eng*. 2009 Feb;35(2):184–92.
76. Zhang T, Liu C, Wei L, Tian S, Li J, Ndayambaje P, et al. Performance of tidal and non-tidal mangrove constructed wetlands in treating maricultural wastewater. *Water Science and Technology*. 2022 May;85(9):2772–85.
77. Tondera K, Rizzo A. Humedales de flujo vertical tipo francés. In: Arias CA, Vera-Puerto IL, Rodríguez T, editors. Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales. IWA PUBLISHER; 2023. p. 129–32.
78. Millot Y, Troesch S, Esser D, Molle P, Morvannou A, Gourdon R, et al. Desing improvements for high ammonium removal by one-stage vertical flow constructed wetlands. *Ecol Eng*. 2016;97:516–23.
79. Mejía JL, Guillén C. Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial tipo francés a escala piloto para el tratamiento de las aguas residuales del proyecto porcino de la Universidad Francisco de Paula Santander-Ocaña, Colombia [Tesis de Licenciatura]. [Ocaña, Colombia]: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña; 2019.
80. Cappato J. Humedales: los "riñones" del Planeta. *Ecosistemas*. 1999;8(1):33–5.
81. Brix H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development status, and future perspectives. *Water Scienicie and Technology*. 1994;30:209–23.
82. Luna-Pabellón V, Miranda-Ríos M. Estado del arte y perspectivas de aplicación de los humedales artificiales de flujo horizontal en México . Serie: Tratamiento biológico de aguas residuales . Researchgate. 2001;(January 2017):132.
83. Kickuth R. A low-cost process for purification of municipal and industrial waste water. *Der Tropenlandwirt*. 1982;83:141–54.
84. Vymazal J. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land (Basel)*. 2022 Jan 21;11(2):174.
85. Kadlec R, Wallace S. Humedales de tratamiento. 2da Edición. CRC Press; 2009. 1–366 p.
86. UN-HABITAT. Manual de Humedales Construidos [Internet]. 2008 [cited 2024 Dec 14]. Available from: <https://unhabitat.org/constructed-wetlands-manual>
87. Davis L. Un manual de humedales construidos: Una guía para crear humedales para aguas residuales agrícolas, aguas residuales domésticas, drenaje de minas de carbón y aguas pluviales en la región del Atlántico Medio [Internet]. Vol. 1. 1995 [cited 2024 Dec 14]. 1–53 p. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/constructed-wetlands-handbook.pdf>
88. CONAGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales [Internet]. 2018 [cited 2024 Dec 14]. Available from: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
89. Brown DS, Kreissl JF, Gearhart RA, Kružic AP, Boyle WC, Otis RJ. Manual: Tratamiento de Aguas Residuales Municipales mediante Humedales Construidos [Internet]. 2000 [cited 2024 Dec 14]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30004TBD.PDF?Dockey=30004TBD.PDF>
90. Sun G, Zhao Y, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *J Biotechnol*. 2005 Jan;115(2):189–97.
91. Prost-Boucle S, Molle P. Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. *Ecol Eng*. 2012 Jun;43:81–4.
92. Arias CA, Del Bubba M, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Res*. 2001 Apr;35(5):1159–68.
93. von Sperling M. Lodos activados y reactores de biopelícula aeróbica. Vol. 5. Londres, UK: IWA Publishing; 2007. 1–338 p.