

Experiencias en la utilización de humedales artificiales para el saneamiento de aguas residuales domésticas en poblaciones rurales

Experiences in the use of artificial wetlands for the sanitation of domestic wastewater in rural populations

Aldo Antonio Castañeda-Villanueva*

Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, Av. Rafael Casillas Aceves No. 1200, 47620 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. Tel. (+52) 378 7828033, Fax (+52) 378 7828035, Correo-e (*e-mail*): acastaneda@cualtos.udg.mx

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia

Recibido: Mayo 10, 2022

Aceptado: Junio 30, 2022

RESUMEN

En principio, los humedales artificiales para el saneamiento de aguas residuales son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos menores a un metro, con plantas propias de zonas húmedas principalmente del tipo "macrofitas" donde los mecanismos para la descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. Estos sistemas también se utilizan para restaurar ecosistemas y para la biorremediación de suelos contaminados. Se caracterizan principalmente por su simplicidad de instalación, operación y mantenimiento, así como bajo o nulo consumo energético, limitada generación de residuos y excelente incorporación al ambiente rural. Los tipos más comunes son los de flujo superficial y sub-superficial, verticales y horizontales, así como híbridos. Si bien requieren mayores extensiones de terreno y tiempos de residencia hidráulica más largos que los sistemas convencionales de saneamiento, representan una alternativa viable económicamente y sustentable ambientalmente para poblaciones rurales. En el presente estudio se evaluaron siete sistemas de tratamiento para aguas residuales domésticas que incluyen humedales artificiales localizados en los estados de Michoacán y Jalisco (México), cuantificando y observando reducciones significativas mayores al 96% en parámetros evaluados como: Demanda química de oxígeno, conductividad específica, nitrógeno total y fósforo total. Sin embargo, la falta de mantenimiento adecuado en estos sistemas evita el cumplimiento completo con la normatividad oficial vigente para la descarga de aguas tratadas a bienes nacionales, así mismo se evidencia la necesidad de implementar estrategias para el control microbiológico y la reutilización segura de las aguas tratadas por estos mecanismos naturales. Su correcta implementación asegurará el mejoramiento del ambiente y el desarrollo humano, social y económico de las poblaciones rurales.

Palabras clave: Aguas residuales domésticas, humedales artificiales o construidos, parámetros de calidad del agua

ABSTRACT

In principle, artificial wetlands for wastewater treatment are passive purification systems made up of lagoons or shallow channels less than one-meter-deep, with plants typical of wetlands, mainly of the "macrophyte" type, where the mechanisms for decontamination are simultaneously executed by physical, chemical and biological components, these systems are also used to restore ecosystems and for the bioremediation of contaminated soils. They are mainly characterized by their simplicity of installation, operation and maintenance, as well as low or zero energy consumption, limited waste generation, and excellent incorporation into the rural environment. The most common types are: Surface and sub-surface liquid level, horizontal and vertical flow, and hybrid ones. Although they require larger extensions of land and longer hydraulic retention times than conventional sanitation systems, they represent an economically viable and environmentally sustainable alternative for rural populations. In the present study, seven treatment systems for domestic wastewater were evaluated, including artificial wetlands located in the states of Michoacán and Jalisco (Mexico), quantifying and observing significant reductions greater than 96% in parameters evaluated such as: Chemical oxygen demand, specific conductivity, total nitrogen and total phosphorus. However, the lack of adequate maintenance in these systems prevents full compliance with current official regulations for the discharge of treated water to national land and water resources, as well as the need to implement strategies for microbiological control and safe reuse of water. Their correct implementation will ensure environmental improvement and human, social, and economic development of rural populations.

Keywords: Domestic wastewater, artificial or constructed wetlands, water quality parameters

Introducción

En la actualidad, con la denominación de Humedales Artificiales (HA) o construidos se ha catalogado un amplio conjunto de espacios naturales de origen antrópico, de muy diferente génesis, magnitudes y morfologías, que alberga contrastados procesos naturales y distintas formas de gestión y organización social. Entre las lagunas construidas para la depuración de aguas residuales de sistemas urbanos, las colas de los grandes embalses de regulación fluvial o las pequeñas charcas para ganado o riego, hay un variado mosaico de espacios que aúnan numerosos valores naturales y culturales. Todos ellos responden a una voluntad humana de transformación y domesticación del medio, con la finalidad de optimizar la gestión de los recursos naturales o maximizar la producción agropecuaria, el dominio de la tecnología hidráulica determina la complejidad y magnitud de estos humedales, que han sido desarrollados desde la antigüedad en diferentes rincones del planeta (Montes-de-Oca, 2021).

En general, los HA para tratamiento de aguas son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos menores a un metro, con plantas propias de zonas húmedas principalmente macrofitas y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos, estos sistemas también se utilizan para restaurar ecosistemas y para la biorremediación de suelos contaminados. Los HA se han clasificado tradicionalmente en dos tipologías atendiendo a si la circulación del agua es de tipo subterránea o superficial. En los de flujo superficial (en inglés *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las plantas macrofitas. En realidad, este tipo de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad (no mayor a los 40 cm) y con plantas. En los humedales de flujo sub-superficial (en inglés *subsurface flow constructed wetlands*) la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular, con una profundidad de la lámina de agua de alrededor de 60 cm y en contacto con los rizomas y raíces de las plantas (Figura 1).

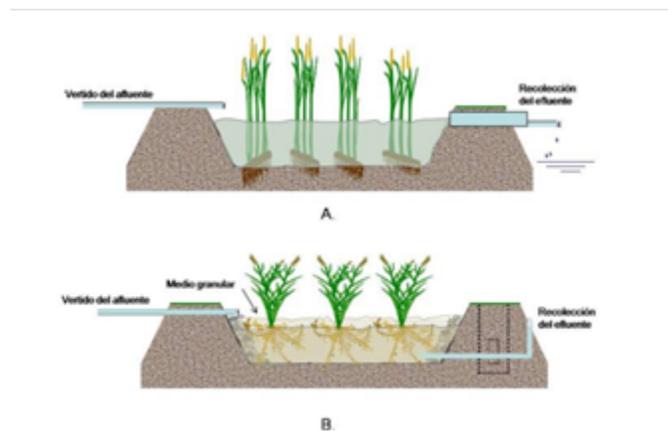


Figura 1. Tipos de HA para el tratamiento de aguas: A) Superficial y B) Sub-superficial (Estopá, 2018)

Este tipo de humedales se podrían entender como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. Así pues, los humedales de flujo sub-superficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno (como los filtros verdes y los sistemas de infiltración-percolación), mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua (como en las lagunas) (Kadlec et al., 2000).

Los HA de flujo sub-superficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales; los humedales con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes (Vymazal y Masa, 2003).

Los humedales con flujo vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades muy diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente.

En particular, se afectan la transferencia de oxígeno y, por tanto, al estado de oxidación-reducción del humedal. Los sistemas con flujo horizontal tratando aguas residuales urbanas, operando con cargas superficiales razonables: 2-6 g DBO/m².día (García, 2003) producen efluentes con ausencia de oxígeno, potencial redox muy negativo (menor en muchos casos de -100 mV) y posibilidad de malos olores (García et al., 2004; Huang et al., 2004). Además, estos efluentes pueden volverse blanquecinos debido a la precipitación de carbonatos y en relación con la sulfato-reducción (Hammes y Verstraete, 2002). Todos estos problemas se pueden evitar operando con cargas menores o según trabajos recientes con profundidades de la lámina de agua de 30 cm (García et al., 2005). Hay que indicar que los humedales con flujo horizontal se han diseñado generalmente con profundidad de 60 cm.

Los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m².día), según estimaciones realizadas a partir de datos de Cooper (2003), producen efluentes más oxigenados, valores de concentración de oxígeno de hasta 13 mg/L, cercanos al 90% de saturación, según las experiencias de Martí (2003) en Dinamarca y durante invierno y libres de malos olores. No obstante, la experiencia disponible con sistemas verticales corresponde principalmente a estudios realizados en el norte y centro de Europa donde las condiciones ambientales y las características de las aguas residuales son muy diferentes a las del Mediterráneo. Es necesario en México realizar más experiencias al respecto, especialmente a escala real ya que se tienen solamente a escalas de laboratorio, de banco y de demostración o prototipo (Amábilis-Sosa, 2015; Esponda-Aguilar, 2001; Fenoglio-Limón, 2003; García-Mercado, 2016; García-Vázquez, 2005; Guido-Zárate, 2006; Guzmán-Aguirre, 2004; Huanosta-Gutiérrez, 2006; Maya-Jasso, 2008; Miranda-Méndez, 2017; Orduña-Bustamante, 2012; Padrón-López, 2005; Reyes-Luz, 2006; Rodríguez-Cruz y Varela-Montellano, 2003; Rodríguez-Monroy, 2005; Soto-Esquivel, 2003).

Los HA de flujo superficial se suelen utilizar como tratamiento adicional a efluentes previamente tratados en depuradoras de tipo convencional. Hay muy pocos sistemas a escala real que traten directamente aguas residuales (Kadlec y Knight, 1996). Los humedales de flujo superficial suelen ser sistemas de gran tamaño con extensiones de varias e incluso hasta centenares de hectáreas. Además, en este tipo de proyectos, los objetivos de restauración y creación de nuevos ecosistemas en general tienen una gran importancia. En Catalunya destacan instalaciones como la de Empuriabrava con unas 7 hectáreas e integrada en el Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà (García y Mujeriego, 1997) y la de Granollers de 1 hectárea y que forma parte de un parque periurbano. Son instalaciones que producen de forma fiable efluentes de gran calidad, por ejemplo, en el caso de Granollers menos de 2 mg NH₃-N/L, con excepción de invierno, y menos de 100 CF/100 mL, de forma bastante sistemática (García y Mujeriego, 1997).

Los humedales de flujo sub-superficial son instalaciones de menor tamaño y que en la mayoría de los casos se utilizan como sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en casas, viviendas aisladas y núcleos de menos de 2,000 habitantes (Cooper, 2003; Rousseau et al., 2004).

En Catalunya hay un buen número de instalaciones de estas características o que combinan humedales de flujo sub-superficial con otros tipos de sistemas naturales de depuración. Destacan sistemas como el de la urbanización Can Suquet en Les Franqueses del Valles (110 hab-eq, 440 m²) y diversas Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) gestionadas por la Agencia Catalana de l'Aigua como Arnes (1301 hab-eq, 3750 m²), Cervia de Ter (800 hab-eq, 2990 m²), Corbins (2,000 hab-eq, 2450 m²), Verdú (2,000 hab-eq, 2210 m²), Vilaplana (576 hab-eq, 2240 m²) y Els Hostalets de Pierola (1,200 hab-eq, 800 m²) entre otras. Los datos numéricos de estas instalaciones se han obtenido de los trabajos de Collado (2000) y de García et al. (2003) y corresponden fundamentalmente a datos de diseño obtenidos a partir de los proyectos constructivos; la superficie

hace referencia a la ocupada como mínimo por humedales de flujo sub-superficial, y no incluye otras unidades de tratamiento, de aquí que no haya una relación clara entre población equivalente servida y superficie. En general, se trata de instalaciones que tratan desde decenas hasta varias centenas de m³/d. Los niveles de depuración conseguidos en estas instalaciones son, en general, los correspondientes a un tratamiento secundario (menos de 25 mg/L de DBO y de materia en suspensión) y, de forma intuitiva, se puede afirmar que en los humedales de flujo sub-superficial priman los aspectos de tratamiento del agua y en los superficiales los de restauración ambiental.

Al igual que otros sistemas naturales de depuración, los HA presentan algunas ventajas frente a los sistemas convencionales de tratamiento, entre las cuales cabe destacar las siguientes (García et al., 1997, 2001a,b):

- Simplicidad en la operación. Requieren un tiempo bajo de operarios y pocos equipos electromecánicos. El tiempo de operario necesario estimado en una evaluación sobre los sistemas de depuración de aguas residuales urbanas mediante lagunaje en Catalunya, similares a los humedales, llevada a cabo bajo el patrocinio de la Agencia Catalana del Agua, fue un promedio de 0.6 horas/día (García et al., 2001b). Pueden ser explotados por operarios con poca experiencia en tratamiento de aguas residuales. Diseño, instalación y operación muy compactos y de fácil implementación con poca mano de obra especializada, así como pocos o ningún equipo electromecánico (García et al., 2001a,b).
- Consumo energético mínimo o nulo. En general limitado al pretratamiento o a elevaciones. En sistemas de lagunaje con requerimientos similares de pretratamiento y elevaciones el consumo osciló entre 0 y 0.19 kWh/m³ (García et al., 2001b).
- Baja producción de residuos durante la operación del sistema. Los residuos y fangos se suelen limitar a los generados por el pretratamiento y el tratamiento primario primario (García et al., 2001a,b). En el sistema de la urbanización de Can Suquet en Les Franqueses del Valles (110 hab-eq) desde marzo del 2001 hasta la actualidad junio de 2004 sólo se han tenido que evacuar dos veces los fangos acumulados en el tratamiento primario con un camión cisterna o cuba (García, 2003).
- Bajo costo de explotación y mantenimiento en la operación del sistema. Los costes actuales de los sistemas que gestiona la Agencia Catalana del Agua (EDAR de menos de 2,000 hab-eq) se encuentran en torno a 24,000 y 30,000 €/año (Robusté, 2004). Esta ventaja es en realidad una consecuencia de las anteriores.
- Fiabilidad en la operación del sistema de tratamiento. Son sistemas con tiempos de retención hidráulicos muy altos, de tal forma que las variaciones puntuales de caudal o carga contaminante afectan poco al nivel de depuración (García, 2003).
- Mínimo impacto ambiental sonoro, así como aceptable integración con el medio natural (García, 2003).
- Gran potencial para la creación y restauración de zonas húmedas aptas para desarrollar la vida silvestre, la educación ambiental y las zonas de recreo (García, 2003).

Los principales inconvenientes frente a los sistemas convencionales son:

- Requieren una superficie netamente superior; entre 20 y 80 veces más área superficial que los sistemas mecanizados de tratamiento (Collado, 2000).
- Costo de construcción similar, o incluso mayor si se debe adquirir el terreno donde se realiza la obra. La necesidad de equipos en instalaciones convencionales se ve compensada por los grandes

movimientos de tierra que se precisan en sistemas de humedales. Se debe estudiar cada proyecto en particular (García et al, 2004b).

- Larga puesta en marcha. Desde algunos meses o un año en sistemas con flujo sub-superficial hasta varios años en sistemas con flujo superficial (Kadlec et al., 2000), ya que dependen principalmente de las condiciones climatológicas.
- Difíciles de diseñar adecuadamente dado el alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes. No hay un acuerdo claro en cuanto a los valores de parámetros necesarios para el diseño. A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se muestran los valores de las constantes cinéticas de primer orden para la reducción de la DBO en HA de flujo sub-superficial horizontal según diferentes autores.

Tabla 1. Valores de las constantes cinéticas de primer orden para humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal, para reducción de DBO (Rousseau et al., 2004)

Referencia (año)	Valor de la constante cinética (m/día)	Comentarios
Cooper (1990), en Rousseau et al., 2004	0.067-1.0	Gran Bretaña
García et al. (2004)	0.011-0.091	En planta piloto
Kadlec y Knight (1996), en Rousseau et al., 2004	0.085-1.0	-
Kadlec et al. (2000), en Rousseau et al., 2004	0.133	República Checa
Schierup et al. (1990), en Rousseau et al., 2004	0.083	Dinamarca
Vymazal et al. (1998), en Rousseau et al., 2004	0.19	Según Kickuth

- Pocos o ningún factor de control durante la operación. En muchos casos sólo se puede controlar la profundidad del agua. Los errores de diseño o constructivos son muy difíciles de corregir de forma sencilla. Si el efluente no tiene la suficiente calidad es complicado mejorarlo sin la necesidad de hacer una buena inversión (García, 2003).
- Los de flujo sub-superficial son muy susceptibles a la colmatación del medio granular si el agua tiene un contenido elevado en determinados contaminantes, como por ejemplo grasas y aceites. También se colmatan si reciben aportes continuados de materiales finos inertes, por ejemplo, debido a la escorrentía superficial. Es muy costoso reemplazar el medio granular. En principio se parte de la idea que no se deberá reemplazar el material granular (Huang et al., 2004).
- Es posible que generen en mayor proporción gases del efecto invernadero con un gran potencial de calentamiento global (CH_4 y N_2O) (Mander et al., 2003). Este es un aspecto que requiere de más investigación.

Por otra parte, las plantas macrofitas son aquellas que pueden vivir en zonas y suelos inundados ya sea permanentemente o bien durante largos períodos de tiempo, también son conocidas como plantas palustres (Figura 2).



Figura 2. *Juncus acutus* (Flores y plantas magazine on line, 2017)

Este tipo de vegetación, según su morfología y fisiología, puede clasificarse de diferentes formas; dependiendo de la forma en que se sujetan al sustrato o suelo, en este caso se tienen (Robusté 2004):

- 1) Plantas macrofitas emergentes, son generalmente plantas perennes con órganos reproductores aéreos, que viven en suelos anegados de forma permanente o temporal.
- 2) Plantas macrofitas de hojas flotantes, son principalmente angiospermas, sus órganos reproductores son flotantes o aéreos y viven sobre suelos anegados.
- 3) Plantas macrofitas sumergidas, las cuales en su mayoría son variedades de helechos y musgos entre otros, conteniendo a las angiospermas. Este tipo de plantas se encuentran en toda la zona a la cual llega la luz solar y no suelen vivir (las angiospermas vasculares) más allá de los 10 m de profundidad aproximadamente. Sus órganos reproductores suelen ser o bien aéreos, flotantes o sumergidos.

En general, son especímenes vegetales que dependiendo del nivel nutricional del medio donde se encuentren y las condiciones climatológicas, puede alcanzar alturas y volúmenes (biomasa) considerables: Entre los 30 y 120 cm en el caso de los juncos, de 60 a 130 cm en los esparganios, entre 120 y los 240 cm en las enneas y de 160 a 320 cm en los carrizos. Aunque es probable que se trate de formas macroscópicas de vegetación acuática, en estos sectores no se suelen englobar, asociados con plantas macrofitas, a grupos como las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos) adaptados a la vida acuática, sino más bien a un amplio grupo de plantas angiospermas. Así mismo, existen macrofitas flotantes las cuales comprenden un amplio y variado grupo de plantas, destacándose para depuración de efluentes: Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), salvinia (*Salvinia* spp.), redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) y lentejas de agua (*Lemna* spp., *Spirodella* spp.) (Robusté, 2004; García 2003; Soto-Esquivel, 1997).

La biorremediación con plantas macrofitas se define como el proceso para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural, mediante este mecanismo es posible disminuir la concentración de contaminantes específicos del suelo. Por otro lado, la fitodepuración es la técnica de purificación caracterizada por tratamientos de tipo biológicos, en los cuales las plantas, creciendo en agua saturada de nutrientes, desarrollan un papel clave y directo sobre las bacterias que colonizan el sistema de raíces y el rizoma (Robusté, 2004).

El filtro verde se basa en la utilización de plantas macrofitas emergentes, las cuales se suelen encontrar de forma natural enraizadas en el terreno, como son el caso de la *Typha*, *Scirpus*, *Iris*, *Sparganium*, entre otras. El método consiste que transformar su asiento natural con estructuras artificiales flotantes que, al flotar estas especies, forman un tapiz o tapete denso de raíces y rizomas que ocupa todo el volumen del colector (laguna o canal), forzando el flujo hidráulico para que toda el agua a tratar circule por la masa de sus sistemas radiculares, que soportan microorganismos que degradan los contaminantes presentes, especialmente la materia orgánica biodegradable. Estos sistemas de filtros verdes con plantas macrofitas en flotación también permiten eliminar elementos eutrofizantes, en especial el fósforo y el nitrógeno e, incluso, metales pesados y fenoles.

Los HA son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos, normalmente de menos de 1 metro, plantados con plantas propias de zonas húmedas (macrofitas acuáticas) y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. En el caso de depuración de aguas residuales, dado que entre las adaptaciones que presentan estas especies, destaca su capacidad para traslocar oxígeno desde la parte aérea hasta las raíces (Fenoglio-Limón, 2003; Soto-Esquivel, 2003), favorece el establecimiento de colonias de microorganismos que contribuyen a la eliminación de contaminantes, poseen capacidad de absorción de nitrógeno, fósforo y metales pesados, entre otros contaminantes, mejorando la calidad de las aguas (Salgado-Bernal et al., 2012a,b,c).

Tradicionalmente los HA se clasifican en dos, según la circulación del agua en ellos: Superficial o sub-superficial. En los de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las macrofitas, siendo una variante del sistema de tratamiento tipo laguna o estanque convencional, con profundidades máximas de 50 cm. En los humedales de flujo sub-superficial la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular, con una profundidad del agua de aproximadamente 60 cm y en contacto con los rizomas y raíces de las macrofitas y este tipo es una adecuación de los sistemas convencionales de infiltración y percolación en suelos (Rousseau et al., 2004).

Así mismo, los HA de flujo sub-superficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales, verticales o híbridos. Los humedales con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes (Vymazal y Masa, 2003).

Con base en esta introducción, se hizo un estudio comparativo entre varios sistemas de humedales artificiales instalados en México para el tratamiento de aguas residuales domésticas que incluyen humedales artificiales localizados en los estados de Michoacán y Jalisco (México), cuantificando y observando algunos parámetros de operación y su desempeño con respecto de la normatividad oficial vigente para la descarga de aguas tratadas a bienes nacionales. A continuación, se presentan los avances de esta investigación.

Materiales y métodos

Aguas residuales domésticas

Se denominan aguas residuales domésticas a aquellas que resultan del uso doméstico o comercial del agua potable, otras denominaciones son: Aguas servidas, efluentes contaminados, aguas negras o aguas cloacales. En general, por haber sido utilizadas en procesos de limpieza, procesamiento de alimentos y demás usos domésticos, estas constituyen en la mayoría de las veces un desecho o residuo. Conteniendo generalmente gran variedad de componentes que pueden ser perjudiciales, tanto para los seres vivos como para el ambiente.

Parámetros de medición empleados

En México, para medir el grado de contaminación de las aguas residuales se utilizan varios parámetros expresados en la normatividad oficial vigente contenidas principalmente en las normas oficiales mexicanas; NOM-001-SEMARNAT-1996, "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 1996a), NOM-002-SEMARNAT-1996, "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1996b) y NOM-003-SEMARNAT-1997, "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (DOF, 1997). Entre los parámetros más comunes que se cuantifican para evaluar el funcionamiento de los HA se encuentran: 1) La demanda química de oxígeno (DQO): Se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en mg/L O₂ y en su valor numérico incluye a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), cuyo valor regularmente es menor. 2) El nitrógeno total (Nt): Es un indicador utilizado en ingeniería ambiental, refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminos, etc.) y el ion amonio NH₄⁺. En plantas tratadoras de aguas residuales, se mide el nitrógeno total capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y que posteriormente puede ser desnitrificado a nitrógeno gaseoso. Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales, su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización (enriquecimiento excesivo de nutrientes en un ecosistema acuático). El nitrógeno se presenta en diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. 3) El fósforo total

(Pt): Se encuentra en las aguas naturales y aguas servidas casi exclusivamente en forma de fosfatos, estos se clasifican a su vez en: orto fosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta- y poli fosfatos) y fosfatos orgánicamente ligados, la determinación del fosfato total incluye dos pasos: El primero consiste en la conversión a orto-fosfato disuelto, todas las diferentes formas del fósforo presente incluyendo el fósforo reactivo, el hidrolizable y el orgánico, el segundo paso consiste en la detección del orto-fosfato en solución por algún método cuantitativo, por ejemplo colorimetría con longitudes de onda entre 400 y 470 nanómetros (nm). El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida y su exceso en el agua provoca también eutrofización. 4) Conductividad específica o eléctrica (CE): Es la medida de las cargas iónicas que circulan dentro del agua, esta medida nos ofrece información general de la concentración de sales e iones presentes en el agua. Los iones más habituales hallados en las aguas naturales son: sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Sus concentraciones presentan fuertes oscilaciones, desde bajas concentraciones en los ríos de alta montaña, hasta casos de mayor concentración (agua de mar). También es un factor importante para detección de fuentes de contaminación, para la evaluación del comportamiento del agua para riego y para la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno. Las descargas de aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de aguas pueden aumentar su conductividad específica o eléctrica. La unidad básica para medir la CE son los miliSiemens por centímetro (mS/cm) o microSiemens por centímetro (μ S/cm).

Muestreo en los HA

Los muestreos y análisis de laboratorio se realizaron en la temporada de secas, de noviembre del 2020 a marzo del 2021. Tanto para la recolección de las muestras de agua, como para las determinaciones analíticas en el laboratorio, se observaron los procedimientos y técnicas contenidas en la normativa ambiental oficial vigente en México (DOF, 1996a,b, 1997), que contempla las técnicas establecidas por el manual de métodos estándar para análisis de aguas y aguas residuales (APHA, 2017), utilizando los siguientes métodos y equipos:

- 1) Fotómetro marca Hach modelo DR 2800. Es un espectrofotómetro de espectro visible, con un rango de longitud de onda de 340 nm a 900 nm, programado y calibrado según especificaciones del fabricante para: DQO, Nt, y Pt.
- 2) Reactor digital marca Hach modelo DRB200, para digestión de muestras de agua residual (DQO, Pt y Nt).
- 3) Medidor portátil marca Hach modelo SensION+ EC5 para CE.

Destino de los efluentes de los HA

El agua tratada proveniente de estos cinco sistemas de tratamiento, se descarga directamente al lago de Pátzcuaro.

Zonas de estudio

Las zonas de estudio del presente trabajo son dos localizaciones que cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante HA: La primera comprende cinco poblaciones ubicadas sobre la ribera del lago de Pátzcuaro (Michoacán, México) (Tabla 2a).

Tabla 2a. Poblaciones rurales en la ribera del Lago de Pátzcuaro (Michoacán, México) con HA

Población	Clave	Diseño, he	Capacidad, L/s
Cucuchucho	C	1,080	0.50
Erongarícuaro	E	2,900	3.33
Santa Fe de la Laguna	SFL	2,500	3.00
San Francisco Uricho	SFU	450	0.35
San Jerónimo Purenchécuaro	SJP	950	0.50

Nota: **he**, habitantes equivalentes; **L/s**, litros por segundo

Estos sistemas de tratamiento están formados principalmente por:

- A) Pre-tratamiento: Sistema para la desarenación de las aguas residuales crudas, en el que se separan tanto materiales ligeros (grasas, aceites, plásticos, etc.) por flotación, como pesados (metales, arenas, etc.) por sedimentación.
- B) Tratamiento: Celdas con macrofitas. Plantas: Carrizo común (*Phragmites australis*), alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) y tule (*Typha latifolia*).
- C) Post-tratamiento: Mediante lagunas de maduración y/o humedales de pulimiento (Figura 3).



Figura 3. Ejemplo de humedal artificial: Sistema de tratamiento para las aguas residuales de Erongarícuaro (E), en Michoacán, México

La segunda localización incluye dos poblaciones que se encuentra en la región conocida como Altos en el estado de Jalisco, México, donde se ubican los sistemas de tratamiento para aguas residuales que incluyen HA en las poblaciones de:

- 1) Ojo Zarco (OZ) ubicada en el municipio de Jesús María (Figura 4) y
- 2) Martínez Valadez (MV) en el municipio de Arandas (Figura 5).



Figura 4. Humedal artificial en Ojo Zarco, OZ, municipio de Jesús María, Jalisco, México



Figura 5. Humedal artificial en Martínez Valadez, MV, municipio de Arandas, Jalisco, México

En ambos casos el sistema de tratamiento está formado por:

- 1) Pre-tratamiento: Un sistema para la desarenación de las aguas residuales, en el que se separan tanto materiales ligeros (grasas, aceites, plásticos, etc.) por flotación, como pesados (metales, arenas, etc.) por sedimentación, construido en mampostería.
- 2) Tratamiento: Conformado por el propio HA que, para el caso de OZ, utiliza grava de varias dimensiones (0.6 a 3.8 cm, porosidad del 40%) como sustrato y especímenes de gladiolo (*Gladiolus* spp.), como especímenes para el tratamiento. Por su lado, el de MV dispone de tezontle (1 a 2 cm, porosidad 60 %) como sustrato y principalmente lirio acuático (*Eichhornia crassipes*).
- 3) Post-tratamiento: En el caso de OZ se dispone de una laguna de oxidación con tule (*Typha latifolia*) y para el de MV una laguna facultativa sin vegetación.

La Tabla 2b muestra las características de estos dos sistemas.

Tabla 2b. Poblaciones rurales en Jalisco, México, con HA

Población	Clave	Diseño, he	Capacidad, L/s
Ojo Zarco	OZ	900	0.65
Martínez Valadez	MV	750	0.50

Nota: **he**, habitantes equivalentes; **L/s**, litros por segundo

Los tiempos de residencia hidráulica de todos los sistemas de tratamiento evaluados fueron de 3 a 4 días, la temperatura promedio fue de 21°C, con humedades relativas promedio del 50%.

Los análisis estadísticos de los datos experimentales siguieron las metodologías convencionales (Statgraphics, 2021).

Resultados y discusión

En la Tabla 3 se muestran los datos promedio (sin desviaciones estándar) obtenidos de los parámetros de control para el agua cruda y tratada de cada humedal, así como el porcentaje de reducción correspondiente (sin cifras decimales).

Tabla 3. Resultados de las evaluaciones paramétricas y porcentajes de reducción en los HA evaluados

Parámetro (unidad)	DQO (mg/L)			Nt (mg/L)			Pt (mg/L)			CE (μS/cm)		
	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R
C	1654	281	83	134	68	49	23.6	14.8	37	1494	137	91
E	1378	125	91	138	60	57	18.7	11.3	40	2750	319	88
SFL	1776	65	96	154	55	64	21.8	11.3	48	1460	187	87
SFU	1675	275	84	147	75	49	22.4	15.3	32	1864	216	88
SJP	1689	88	95	154	61	60	18.9	6.7	65	1739	195	89
MV	413	82	80	82	12	85	43.1	8.8	80	895	90	90
OZ	396	237	40	91	27	70	42.8	16.9	61	843	152	82
Referencia (NOM)	120			15			5			250		

Nota: E= entrada; S= salida; %R= Porcentaje de reducción; DQO: Demanda química de oxígeno; Nt: Nitrógeno total; Pt: Fósforo total; CE: Conductividad eléctrica; C: Cucuchuco; E: Erongarícuaro; SFL: Santa Fe de la Laguna; SFU: San Francisco Uricho; SJP: San Jerónimo Purenchécuaro; MV: Martínez Valadez; OZ: Ojo Zarco; NOM: Norma Oficial Mexicana

Es posible observar reducciones importantes de los parámetros cuantificados; para DQO del 40% (OZ) hasta el 96% (SFL), para Nt de 49% (C, SFU) hasta el 85% (MV), para Pt de 32% (SFU) hasta el 80% (MV) y para la CE de 82% (OZ) hasta el 91% (C), destacándose en esta ocasión la mejor operatividad los HA de MV (Jalisco) y SJP (Michoacán). Los sistemas de tratamiento que presentan menos efectividad fueron los de OZ (Jalisco) y los de C y SFU (Michoacán).

Con referencia al cumplimiento con la normatividad oficial vigente, la mayoría de los HA evaluados exceden los límites máximos permisibles para *Pt*, *Nt* y *CE*. Los que se aproximan más al cumplimiento de la normatividad son MV y SJP (Castañeda, 2020).

La falta de mantenimiento preventivo y correctivo, principalmente en los pre-tratamientos (desarenadores) de los siete sistemas de tratamiento con HA, son la causa de las condiciones no adecuadas en la descarga de las aguas tratadas y la falta de cumplimiento con la norma oficial mexicana correspondiente recientemente modificada (SEMARNAT, 2021), aunque las reducciones de los parámetros evaluados son importantes (Castañeda et al., 2018).

Conclusiones y perspectivas

Tomando en consideración tanto los costos de instalación, como los requerimientos operativos de los sistemas para el saneamiento de aguas residuales domésticas con HA, estos presentan una alternativa económicamente viable y ambientalmente sustentable, principalmente para poblaciones rurales que dispongan de terrenos disponibles y condiciones climatológicas favorables. Es de importancia recalcar que, aunque el mantenimiento de estos sistemas alternativos es considerablemente menor al de los tratamientos convencionales, es necesario realizarlo regularmente principalmente extrayendo los sedimentos y material flotante en los pre-tratamientos, así como retirar periódicamente la biomasa y vegetación excesiva en las celdas de los humedales para evitar cortos circuitos en el flujo del agua, asegurando los periodos de contacto adecuados.

De igual forma se deben implementar estrategias para: El control microbiológico, los análisis de la calidad de las aguas y el seguimiento a la reutilización de las aguas tratadas. En síntesis, estos sistemas pueden contribuir de manera importante en la disminución de la contaminación tanto de cuerpos de agua superficiales como subterráneos y la preservación de los recursos naturales, beneficiando el desarrollo económico de los entornos locales, la salud y calidad de vida de la población.

Reconocimientos

El autor reconoce al Cuerpo Académico UDG-561 "Gestión integral del agua", así como al "Laboratorio para Análisis de Agua" del Centro Universitario de Los Altos (Universidad de Guadalajara), por la asesoría y el apoyo técnico brindado para el desarrollo del presente estudio.

Glosario de términos

Término	Significado
C	Cucuchucho, Michoacán, México
<i>CE</i>	Conductividad específica o eléctrica
CF	Coliformes fecales (un parámetro importante para medir la calidad del agua)
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
<i>E</i>	Corriente de entrada al humedal artificial
E	Erongarícuaro, Michoacán, México
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
HA	Humedal artificial o construido
Macrófita o macrófita	Estas palabras no aparecen en el diccionario de la lengua española y hay artículos que usan una o la otra sin mayor explicación. [Aviso: La palabra macrófita no está en el Diccionario. La entrada que se muestra a continuación podría estar relacionada: fito- , -fito , ta (fita). Del griego φυτόν

Término	Significado
	<i>phytón</i> . Significa 'planta' o 'vegetal'. Fitografía. [Microfito] (https://dle.rae.es/fito-). En esta contribución se usó la primera
MV	Martínez Valadez, Jalisco, México
NOM	Siglas para Norma Oficial Mexicana
<i>Nt</i>	Nitrógeno total
% R	Porcentaje de remoción entre los valores de entrada y salida
OZ	Ojo Zarco, Jalisco, México
<i>Pt</i>	Fósforo total
<i>S</i>	Corriente de salida al humedal artificial
SFL	Santa Fe de la Laguna, Michoacán, México
SFU	San Francisco Uricho, Michoacán, México
SJP	San Jerónimo Purenchécuaro, Michoacán, México
Tiempo de residencia hidráulico ⁷	Tiempo que permanece en un sistema la fase líquida o fluida
Tiempo de retención celular ⁷	Tiempo que permanece en un sistema la fase sólida

Referencias bibliográficas

- Amábilis-Sosa, L.E. 2015. Remoción de metales pesados en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Agua). Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: Agosto 7, 2015. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2015/mayo/0729948/Index.html
- APHA. 2017. Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater. American Public Health Association. Washington, Estados Unidos.
- Castañeda, A. 2020. Evaluación de humedales construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). Revista Latinoamericana del Ambiente y las Ciencias (BUAP, México). 11: 45-67.
- Castañeda, A., Flores, H., Sahagún, R. 2018. Comparación de tres modelos para el diseño de un humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales de poblaciones rurales en Los Altos de Jalisco. En Las ciencias en los estudios del agua: Viejos desafíos sociales y nuevos retos. Rojas, J., Torres, A., González, O. Coords. Universidad de Guadalajara, 1ª edición. CUTon, ISBN 9786075473222. Guadalajara, México.
- Collado, N. 2000. Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.
- Cooper, P. 2003. Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems. In: The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands, 1st International Seminar. Dias, V., Vymazal, J., editores. Instituto Nacional da Água, pp. 195-218. Lisboa, Portugal.
- Cooper, P.F. Editor. 1990. European design and operations guidelines for reed bed treatment systems. Prepared by EC/EWPCA Emergent Hydrophyte Treatment Systems Expert Contact Group, Water Research Centre. Swindon, Reino Unido.
- DOF. 2021. Norma que sustituye a NOM-001-SEMARNAT-1996a.
- DOF. 1997. NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se 'reúsen' en servicios al público. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0
- DOF. 1996a. NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0
- DOF. 1996b. NOM-002-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. En: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0
- Esponda-Aguilar, P.L. 2001. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis profesional (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Agosto 20, 2001. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2001/295062/Index.html
- Estopá, S. 2018. Comparativo y dimensionamiento básico de diversas tipologías de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del polígono industrial Moncada III (Valencia). Trabajo de fin de grado. Universitat Politècnica de Valencia. España.

⁷ Nota de los editores: En los años 70 del siglo XX en un congreso de la entonces llamada Ingeniería Bioquímica se acuñaron varios términos y se especificaron otros. El primero fue llamar Biotecnología a la Ingeniería Bioquímica. Se instituyó que los equipos donde se realizaban reacciones bioquímicas se llamaran biorreactores y no fermentadores y que esta palabra, en respeto a Louis Pasteur, fuera exclusivamente para la reacción bioquímica de producción de etanol a partir de glucosa en medio anaerobio usando la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Finalmente, en los años 80 en otro congreso, esta vez ya llamado de Biotecnología, se decidió usar dos términos para los tiempos de permanencia dentro de un reactor dependiendo de si eran fluidos o eran sólidos; para el primero se decidió usar la palabra residencia y para el segundo la palabra retención

- Fenoglio-Limón, F.E. 2003. Fenómenos de transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Orientación: Química Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: Junio 5. Ciudad de México, México.
- Flores y plantas magazine on line 2017. Macrófitas en humedales artificiales. En: <https://www.floresyplantas.net/plantas-macrofitas/>
- García, J. 2003. Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In: The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands. 1st International Seminar. Dias, V., Vymazal, J., eds. Instituto Nacional da Água, Pp. 497-520. Lisboa, Portugal.
- García, J., Mujeriego, R. 1997. Humedales construidos de flujo superficial para tratamiento terciario de aguas residuales urbanas en base a la creación de nuevos ecosistemas. *Tecnoambiente*. 75: 37-42.
- García, J., Ruiz, A., Junqueras, X. 1997. Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*. 165: 58-65.
- García, J., Mujeriego, R., Obis, J.M., Bou, J. 2001a. Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean region). *Wat. Pol.* 3: 341-350.
- García, J., Bourrouet, A., Mujeriego, R., Freixes, A., Peñuelas, G. 2001b. Wastewater treatment by pond systems: Experiences in Catalonia, Spain. *Wat. Sci. Tech.* 42(10-11): 35-42.
- García, J., Ojeda, E., Sales, E., Chico, F., Píriz, T., Aguirre, P., Mujeriego, R. 2003. Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.* 21: 129-142.
- García, J., Aguirre, P., Mujeriego, R., Huang, Y., Ortiz, L., Bayona, J.M. 2004. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Wat. Res.* 38(7): 1669-1678.
- García, J., Aguirre, P., Barragán, J., Mujeriego, R., Matamoros, V., Bayona, J.M. 2005. Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands: Long term performance. *Ecological Engineering*. 25:405-418. <https://www.researchgate.net/journal/Ecological-Engineering-0925-8574>
- García-Mercado, H.D. 2016. Biogeoquímica del mercurio en procesos biológicos de remediación con cuatro especies vegetales a nivel de laboratorio. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Suelo). Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: Abril 22. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2016/febrero/0741155/Index.html
- García-Vázquez, L. 2005. Uso de reactores biológicos (humedales artificiales de flujo vertical) para depurar aguas residuales de tipo sanitario. Tesis profesional (Ingeniería Química). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química. Defensa: Febrero 4. Puebla, México.
- Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Julio 04. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/pd2006/0606942/Index.html>
- Guzmán-Aguirre, S. 2004. Evaluación de sistemas de humedales artificiales como depuradores de aguas residuales mediante la eliminación de microorganismos patógenos. Tesis profesional (Química de Alimentos). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Noviembre 24. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2004/0337984/Index.html
- Hammes, F., Verstraete, W. 2002. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology*. 1: 3-7. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1015135629155.pdf>
- Huang, Y., Ortiz, L., García, J., Aguirre, A., Mujeriego, R., Bayona, J.M. 2004. Use of headspace solid-phase microextraction to characterize odour compounds in subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.* 49(9): 89-98.
- Huanosta-Gutiérrez, T. 2006. Estudio de la dinámica y remoción de especies de nitrógeno en humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio. Tesis profesional (Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Diciembre 07. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2007/0613597/Index.html
- Maya-Jasso, E.A. 2008. Mantenimiento preventivo y correctivo de un humedal artificial de flujo vertical a nivel prototipo. Tesis profesional (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Noviembre 21. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2008/diciembre/0637217/Index.html>
- Kadlec, R.H., Knight, R.L. 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press, 893 pp. Florida, Estados Unidos.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Haberl, R. 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp. Londres, Reino Unido.
- Mander, Ú., Kuusemets, V., Lohmus, K., Muring, T., Teiter, S., Augustin, J. 2003. Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Wat. Sci. Tech.* 48(5): 135-143.
- Martí, E. 2003. The recycling effect in the nitrification-denitrification process in vertical flow constructed wetlands. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 120 pp. Barcelona, España.
- Miranda-Méndez, O. 2017. Producción de electricidad en sistemas de humedales artificiales asistidos electroquímicamente: Flujo continuo *versus* flujo intermitente. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Agosto 01. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2017/junio/0761042/Index.html>
- Montes-de-Oca, A. Coord. 2021. *Humedales artificiales en México. Planteamientos alternativos a la extracción de los recursos hídricos*. Primera edición ISBN 978-607-633-270-2. Río Subterráneo Editores. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.
- Orduña-Bustamante, M.A. 2012. Efecto de la relación nitrógeno:potasio en la eficiencia de remoción de contaminantes carbonosos y nitrogenados en agua en sistemas de laboratorio que simulan humedales artificiales. Tesis de Doctorado

- en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Agua). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Marzo 5, 2012. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2012/mayo/0679685/Index.html>
- Padrón-López, R.M. 2005. Depuración de aguas residuales domésticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Programa de la División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Defensa: Noviembre 7. Villahermosa, Tabasco, México.
- Reyes-Luz, M.I. 2006. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tesis profesional (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Diciembre 07, 2006. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2007/0620971/Index.html
- Robusté, J. 2004. Humedales en explotación, experiencia en Catalunya. In: Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales. García, J., Morató, J., Bayona, J.M., eds. Universidad Politécnica de Catalunya, pp. 15-21. Barcelona, España.
- Rodríguez-Cruz, A., Varela-Montellano, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Defensa: Septiembre 26. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ppt2002/0324383/Index.html>
- Rodríguez-Monroy, J. 2005. Estudio de la remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tesis profesional (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Enero 28. 132.248.9.195/ppt2004/0339359/Index.html
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P., De Pauw, N. 2004. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Wat. Res.* 38(6): 1484-1493.
- Salgado-Bernal, I., Carballo-Valdés, M.E., Martínez-Sardiñas, A., Cruz-Arias, M., Durán-Domínguez, C. 2012a. Interacción de aislados bacterianos rizosféricos con metales de importancia ambiental / *Interaction of rhizosphere bacterial isolates with environmentally significant metals*. *Rev. Technol. Ciencias Agua.* 3(3):83-95.
- Salgado-Bernal, I., Martínez-Sardiñas, A., Carballo-Valdés, M.E., Cruz-Arias, M., Durán-Domínguez, M.d.C. 2012b. Diversidad de las bacterias rizosféricas asociadas a plantas de *Typha dominguensis* en humedales del río Almendares. *Revista CENIC Ciencias Biológicas.* 43(3):1-7. <http://www.redalyc.org/pdf/1812/181226874003.pdf>
- Salgado-Bernal, I., Durán-Domínguez, C., Cruz-Arias, M., Carballo-Valdés, M.E., Martínez-Sardiñas, A. 2012c. Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia orgánica de aguas residuales. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 28(1):17-26.
- Schierup, H.H., Brix, H., Lorenzen, B. 1990. Wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark—state of the art. In: *Proceedings of the International Conference on the Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, Cooper, P.F., Findlater, B.C., editors. Cambridge, UK. September, 24-28. Pergamon Press, pp. 495-504. Oxford, Reino Unido.
- Soto-Esquivel, M.G. 2003. Efecto de la generación de oxígeno fotosintético en un sistema sólido-líquido-gas. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua). Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: Diciembre 5. 132.248.9.195/ppt2002/0325827/Index.html
- Soto-Esquivel, M.G. 1997. Tratamiento terciario de aguas residuales agroindustriales mediante el uso de reactores con plantas hidrofítas flotantes (*Hydrocotyle ranunculoides*). Tesis profesional (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: Mayo 20. <http://132.248.9.195/ppt2002/0250185/Index.html>
- Vymazal, J., Masa, M. 2003. Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.* 48(5): 143-148.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Haberl, R., Perfler, R., Laber, J. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. In: *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R., editores. Backhuys Publishers. 366 pp. Leiden, Países Bajos.