

Descontaminación del agua residual de un centro universitario utilizando humedales artificiales: estudio a escala piloto*

Decontamination of wastewater from a university center using artificial wetlands: pilot-scale study

Khirbet López Velázquez^{a*}; Yahir Murakawa Guzmán^b, Carlos Gómez de León^b,
Andrés G. Suárez Santizo^b, Linnet Roque-Romero^b, Cesar Castillo Quevedo^c,
Edwin R. Hoil Canul^b, y José Luis Cabellos Quiroz^d

Resumen / Abstract

La contaminación del agua es un problema ambiental de gran relevancia ya que compromete la salud humana y el acceso seguro al agua limpia y de calidad. En este trabajo estudiamos un sistema de dos humedales artificiales (HA) a escala piloto para la descontaminación del agua residual proveniente de un centro universitario. Los HA se construyeron utilizando cajas de madera, membranas impermeables de polietileno, piedras de río, grava y tierra como soporte para las plantas, el volumen operacional de los HA fue de 108 L. Posteriormente, uno de los HA se plantó con ejemplares de *Alpinia purpurata*, el sistema se operó a un tiempo de retención hidráulica de 72 h y durante toda la experimentación los HA se alimentaron con agua residual. Con este sistema fue posible tratar el agua residual con una eficiencia superior al 70%, reduciendo la demanda química de oxígeno hasta niveles inferiores a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Por lo tanto, los HA representan una tecnología prometedora para su aplicación en procesos de descontaminación del agua.

Palabras clave: agua, contaminación ambiental, fitorremediación, sustentabilidad, tecnología ambiental.

* khirbet.lopez@uptapachula.edu.mx (Autor responsable)

a. El Doctor López es el autor responsable del presente artículo. Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías - Universidad Politécnica de Tapachula, C.P. 30830. Tapachula, Chiapas, México. Correo electrónico: Khirbet.lopez@uptapachula.edu.mx.

b. Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P., 30830, Tapachula, Chiapas, México.

c. Departamento de Fundamentos del Conocimiento, Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, Colotlán C.P. 46200, Jalisco, México.

d. El Doctor José Luis Cabello es Profesor Investigador de la Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P., 30830, Tapachula, Chiapas, México. Correo electrónico: jose.cabellos@uptapachula.edu.mx.

Nowadays, water pollution is an environmental problem of great relevance since it compromises human health and safe access to clean and quality water. In this work, we study a system of two pilot-scale constructed wetlands (CWs) for the decontamination of wastewater from a university center. The CWs used in this work were built with wooden boxes, waterproof membranes, river stones, gravel and soil as plant support, the operational volume of the CWs were 108 L each. Subsequently, one CW was planted with specimens of *Alpinia purpurata* and throughout the experiment the system was fed with raw wastewater at a hydraulic retention time of 72 h. With this system it was possible to treat wastewater with an efficiency greater than 70%, reducing the chemical oxygen demand to levels lower than that established in NOM-001-SEMARNAT-2021. Therefore, the use of CWs represents a promising technology for application in wastewater decontamination processes.

Keywords: water, environmental pollution, phytoremediation, sustainability, environmental technology.

Introducción

Los sistemas de fitorremediación conocidos como humedales artificiales (HA) representan una alternativa económica y accesible para el tratamiento de diversos efluentes, entre ellos: aguas residuales domésticas, municipales, de centros educativos, de fincas agrícolas y de pequeñas comunidades con población entre 1000 y 2000 personas (Pérez et al., 2022). Los HA están constituidos principalmente por el componente vegetal (plantas flotantes, sumergidas o emergentes), los consorcios microbianos (microorganismos aerobios y anaerobios) y el medio de soporte que generalmente son agregados pétreos (rocas, grava y arena). La interacción entre estos componentes da lugar a una serie de complejos procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración del agua residual que fluye a través de estos sistemas artificiales de manera horizontal (superficial o subsuperficial) o vertical (ascendente o descendente) (Delgadillo et al., 2011). De esta manera, los HA pueden remover la materia orgánica, los sólidos suspendidos, nutrientes como nitrógeno y fósforo, algunos metales pesados como hierro, plomo y cadmio, así como contaminantes orgánicos persistentes e hidrocarburos. Además, reducen la contaminación microbiológica y pueden favorecer la eliminación de distintos fármacos y pesticidas en el agua.

En las últimas décadas, los HA se han comenzado a utilizar como una alternativa innovadora, eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales (Magwaza et al., 2020). De hecho, Pérez et al., (2022) reportaron en su investigación que durante la década de 2010 a 2020 se publicaron cerca de 14,245 artículos científicos acerca del estudio de HA para la descontaminación del agua. En este sentido, Aminsharei et al., (2019) y Ma et al., (2019) reportaron la efectiva reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual utilizando humedales artificiales, con eficiencias de eliminación entre 70 y 98 %.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar un sistema de humedales artificiales plantados con ejemplares de *A. purpurata* para el tratamiento del agua residual proveniente de un centro universitario, con ello se busca proponer una alternativa eficaz para la descontaminación del agua, con potencial aplicación en regiones rurales donde carecen de sistemas de tratamiento para los efluentes domésticos, agrícolas, municipales y de centros educativos.

Metodología

Este estudio a escala piloto se realizó en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Tapachula (latitud: 14.746111, longitud: -92.397807) localizada en el municipio de Tapachula, Chiapas, a una altitud de 15 m.s.n.m y temperatura promedio anual de 32 °C. En este centro universitario, la comunidad estudiantil, administrativa y docente se compone de 850 individuos aproximadamente (datos de septiembre 2023 – abril 2024) distribuidos en el horario de 7:00 a 20:00 h de lunes a viernes. En la Figura 1 se muestra la localización de las instalaciones de la universidad y el sitio experimental donde se establecieron los HA. Cabe destacar que los HA se evaluaron durante aproximadamente 120 días para tratar una fracción del agua residual que se genera en la universidad. Además, debe considerarse que este estudio se realizó en la temporada de secas durante los meses de septiembre - diciembre de 2023 y se descarta que los resultados obtenidos reflejen un efecto de dilución por lluvia.



Figura 1. Localización del sitio experimental para la evaluación de los HA plantados con *A. purpurata* (imagen tomada del servicio Google Earth, marzo 2024)

En la Figura 2 se presenta las etapas de construcción de los HA a escala piloto, para ello se emplearon dos cajas de madera con las siguientes medidas: 2 m de longitud en la base superior, 1.6 m de longitud en la base inferior, 0.6 m de ancho y 0.4 m de profundidad. Como barrera impermeable se utilizó membranas de polietileno calibre #12; posteriormente, las cajas de madera se rellenaron con una capa de piedras de río ($\varnothing = 10$ cm aproximadamente), luego se incorporó una capa de grava de $\frac{1}{2}$ " con una altura de 15 cm, cabe destacar que sobre la capa de grava se depositó un inóculo de bacterias anaerobias provenientes de excremento fresco de ganado vacuno (2 L de inóculo para cada HA); posteriormente se depositó una capa superficial de tierra de 10 cm de grosor la cual sirvió como soporte para los ejemplares de *A. purpurata* (densidad de 20 plantas por m^2), cabe destacar que el HA sin plantas se utilizó como tratamiento control.



Figura 2. Etapas de la construcción de los HA: a) dos cajas de madera, b) membrana impermeable de polietileno, c) capa inferior de piedras de río, d) capa de grava y tierra, e) HA plantado con *A. purpurata* (a 60 días de operación)

Ambos humedales artificiales se configuraron en un régimen de flujo horizontal subsuperficial, se anegaron con agua residual para estimar el volumen operacional y posteriormente se ajustó del tiempo de retención hidráulica (TRH = 72 h para cada uno). En la Figura 3 se muestra la configuración general de los humedales artificiales construidos en este trabajo.

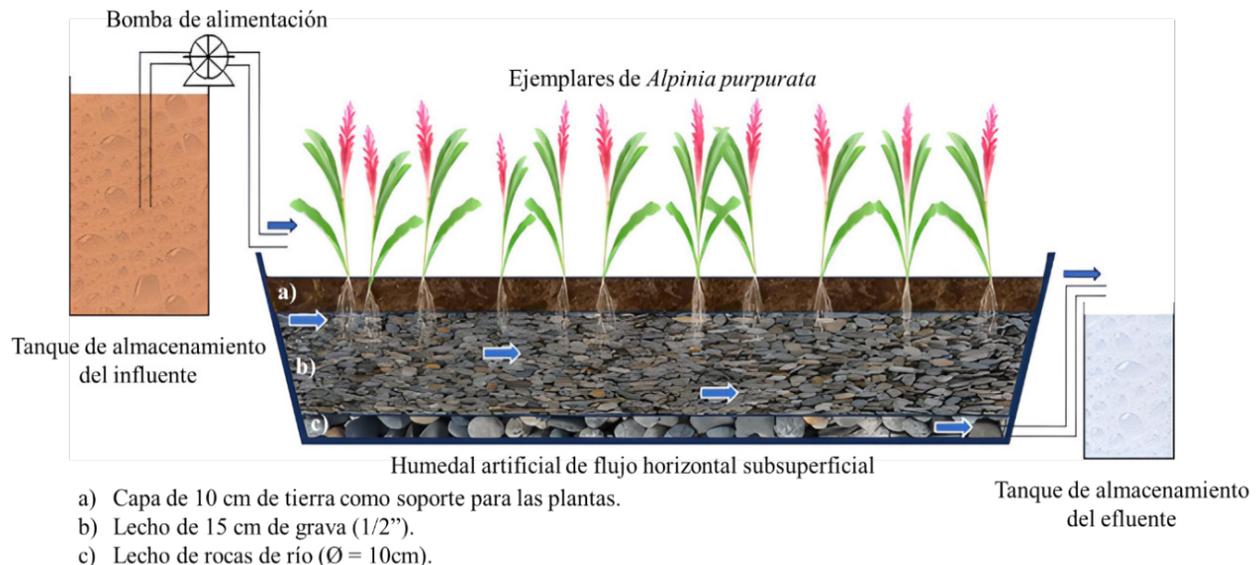


Figura 3. Esquema ilustrativo de los HA empleados en este trabajo para el tratamiento de agua residual proveniente de un centro universitario (elaboración propia)

Los HA se sometieron a una etapa de 30 días de estabilización, tanto para la aclimatación de las plantas y establecimiento de los consorcios microbianos en el lecho de los humedales. Los humedales con volumen operacional de 108 L se operaron a TRH = 72 h y en todo momento se alimentaron con agua residual cruda proveniente del centro universitario. Posterior a la etapa de estabilización, cada 72 h se tomó una muestra de 0.1 L en los efluentes y se midieron los siguientes parámetros de calidad del agua: pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables de acuerdo con la metodología establecida en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2012).

Resultados y discusión

El volumen de agua residual que se genera diariamente en el centro universitario es aproximadamente 3500 L/día y sus principales características se enlistan en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Principales características del agua residual cruda tratada mediante los HA construidos en este trabajo (valor promedio, n = 12)

pH	7.6
Temperatura (°C)	29.2
OD	<1.0
DQO (mg/L)	269.5
ST (mg/L)	2285.3
SDT (mg/L)	2198.2
SST (mg/L)	85.3
Sólidos sedimentables (mg/L)	< 1.0
Turbidez (UNT)	56.9
CE (µS/cm)	3146.4

Fuente: Investigación directa

Cabe destacar que los niveles de pH tanto en la entrada como en la salida de los humedales se mantuvo en el rango de 7.2 a 8.0, lo cual indicó la adecuada estabilidad del sistema para amortiguar la acidificación del agua por la generación de ácidos orgánicos a partir de la descomposición de la materia orgánica (López-Velázquez et al., 2020). En este trabajo, los resultados de la caracterización del agua residual son similares a lo reportado en otro estudio en México, donde también se evaluaron HA plantados con *A. purpurata* para el tratamiento de agua residual generada en otro centro universitario: pH = 7.9, DQO = 482.1 mg/L, SDT = 845 mg/L y SST = 75 mg/L (Lara-Acosta et al., 2022).

En la Figura 4 se observa gráficamente la eficiencia de ambos HA para la eliminación de la DQO, el humedal control (0 plantas) removió 57.6 % de la DQO inicial y el humedal plantado con *A. purpurata* (20 plantas/m²) removió 70.2 % de la DQO inicial; es notable que ambos

humedales tienen la capacidad de reducir el nivel de contaminación del agua residual por debajo de lo marcado en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (fijado en 150 mg/L) que establece los límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, entre ellos: ríos, arroyos, canales y drenes (SEMARNAT, 2021). Los resultados obtenidos demostraron que el humedal con plantas fue el más eficiente para la remoción de la DQO y que la presencia de *A. purpurata* favorece diferencias significativas entre ambos tratamientos (t Student = 2.94; p -value = 0.025, $n = 6$) coincidiendo con lo reportado previamente por Pérez et al., (2022). Así mismo, en estudios previos se ha reportado el uso de HA con *A. purpurata* para el tratamiento de aguas residuales con eficiencia de eliminación de la DQO entre 35 – 70 % (Méndez-Mendoza et al., 2015) lo cual es similar a lo obtenido en este trabajo.

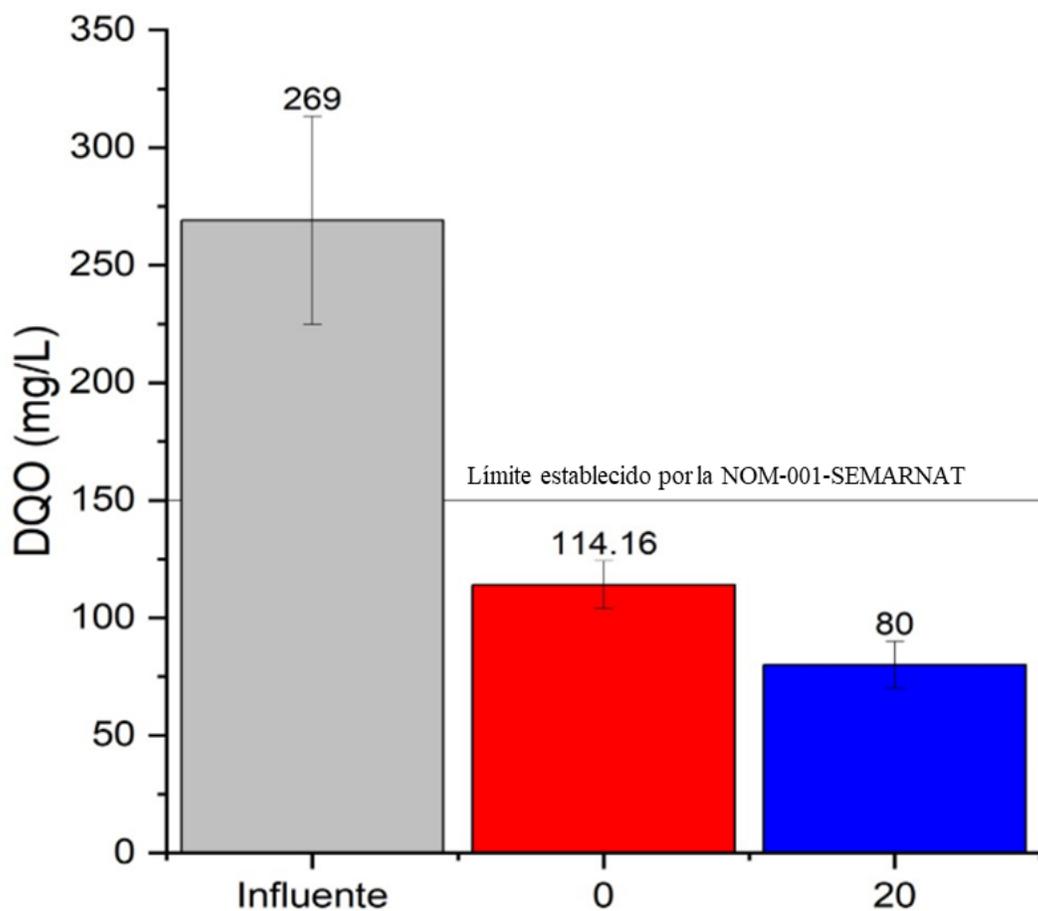


Figura 4. Concentración de la DQO en el agua residual no tratada (influyente) y en los efluentes de ambos HA (0 = tratamiento control, 20 = HA con 20 plantas/m²)

De manera similar, en la Figura 5 se muestran los resultados de la eliminación de SST y de la turbidez, se observa que ambos humedales pueden reducir los SST por debajo de los límites

permisibles fijados por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (60 mg/L). La eficiencia del humedal sin plantas para remover SST y turbidez fue de 67.6%, mientras que la eficiencia del humedal con plantas fue notablemente superior (81.5%) tanto para SST como para la turbidez, lo que coincide adecuadamente con lo reportado previamente con otros estudios donde se ha reportado la notable eficiencia de los HA para remover los SST y como consecuencia la turbidez del agua tratada (Al-Wahaibi et al., 2021). Cabe mencionar que en este trabajo, se observó una mínima disminución de los SDT, los cuales se mantuvieron estables en un rango entre 2190 - 2230 mg/L en el influente y entre 1930 – 2080 mg/L en los efluentes de ambos HA, lo anterior puede atribuirse a que bajo las condiciones descritas los HA son ineficientes para la eliminación de las sales disueltas que conforman los SDT, de acuerdo con lo reportado por Al-Wahaibi et al., (2021).

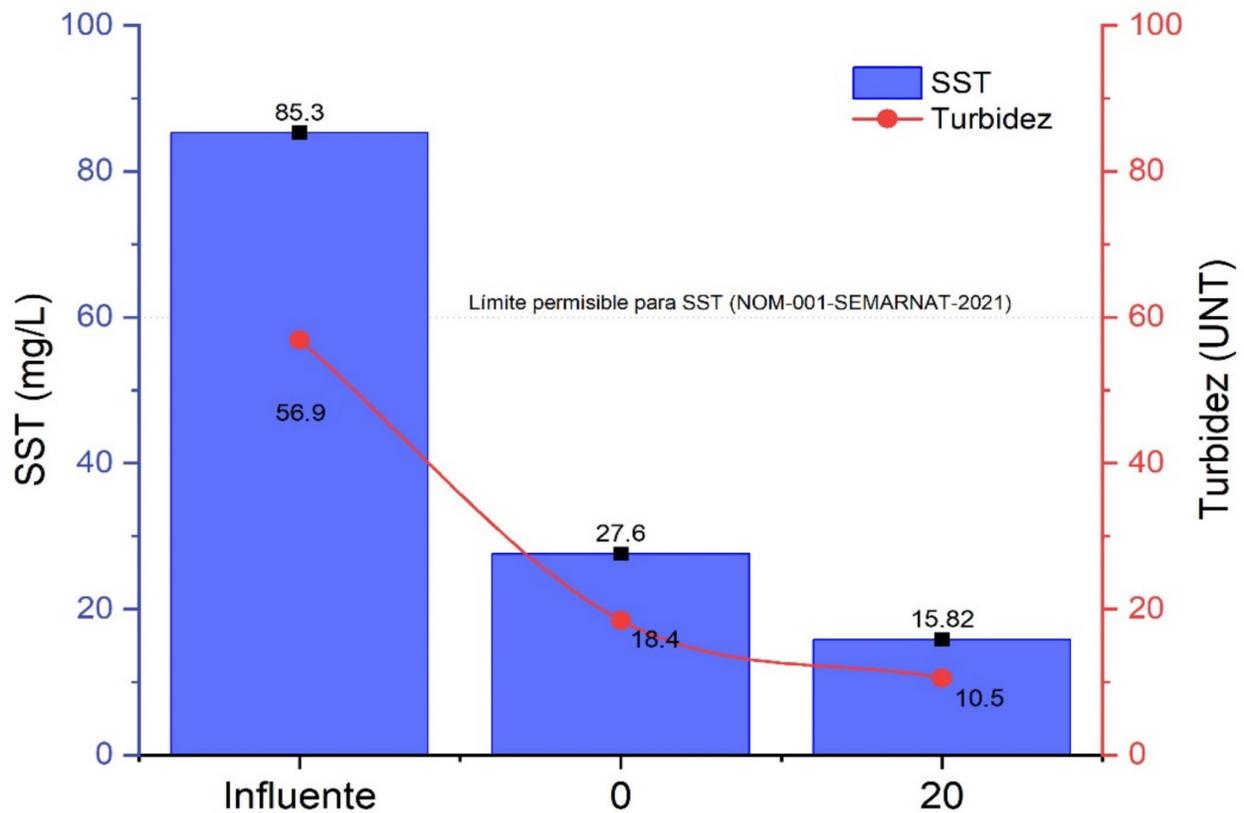


Figura 5. Niveles de SST y Turbidez en los influentes y efluentes de los HA (0 = tratamiento control, 20 = HA con 20 plantas/m²)

Por otra parte, en trabajos previos se ha reportado que entre los principales mecanismos de eliminación de los contaminantes dentro de los HA se encuentran: la bioconversión por bacteria anaerobias y facultativas adheridas a las raíces de las plantas y a las partículas del sustrato (biofilm microbiano), así como la bioconversión por bacterias aerobias asociadas a las raíces de las plantas

en la superficie de los HA. Además, el sustrato de soporte en conjunto con los rizomas y los sistemas radiculares de las plantas favorecen los procesos de filtración, sedimentación, adsorción y translocación de los contaminantes presentes en el agua residual (Al-Wahaibi et al., 2021; Amins-harei et al., 2019; Delgadillo et al., 2011; Ma et al., 2019).

Una vez más, cabe destacar que los HA evaluados son una alternativa adecuada para el tratamiento del agua residual generada en el centro universitario, ya que reducen los niveles de contaminación hasta niveles aceptables para su descarga en ríos y arroyos de acuerdo con lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021, destacando el humedal con plantas como el más eficiente, lo cual representa una contribución positiva para la preservación del ambiente, mediante el desarrollo de tecnologías eficientes para el tratamiento de las aguas residuales. Además, con base en los resultados obtenidos, sugerimos que los HA representan una excelente alternativa para el tratamiento de efluentes domésticos, municipales y agrícolas en regiones rurales que carecen de sistemas de alcantarillado y de plantas de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, como lo demostramos en este estudio, es posible reducir el grado de contaminación del agua residual entre 57 y 70 % (en términos de DQO) y la adopción de estos sistemas a mediana o gran escala puede contribuir significativamente a disminuir el impacto negativo sobre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, ocasionado por las descargas de aguas residuales no tratadas. Incluso, los HA plantados con especímenes tropicales como *A. purpurata* pueden favorecer a realzar notablemente la estética del paisaje y aportar a la economía de los usuarios dado su valor como plantas de ornato.

Por otra parte, entre las principales limitaciones de este trabajo de investigación se destaca la importancia de evaluar los niveles de nutrientes como nitratos y fosfatos, así como la concentración de agentes patógenos (coliformes fecales, totales y *E. coli*) en los influentes y efluentes de los HA. De este modo, se tendrá una visión más clara de la eficiencia de los HA para la descontaminación del agua residual generada en el centro universitario. Aparte, en trabajos posteriores se propone evaluar el efecto de distintos TRH; preliminarmente, en este trabajo se observó que un TRH = 24 h no es favorable para el sistema debido a que el agua residual permanece un menor tiempo dentro de los HA, dando como resultado niveles de eliminación de DQO, SST, SDT y turbidez menores al 20%.

Conclusiones

Los HA constituyen una alternativa adecuada para el tratamiento de agua residual y se destaca que el uso de *A. purpurata* tiene un efecto notablemente positivo en su rendimiento ya que estas plantas favorecen una mayor eliminación de la carga contaminante hasta niveles inferiores a lo establecido en normativas nacionales. Los HA son una alternativa práctica, eficiente y de bajo costo en comparación con las PTAR convencionales y se sugiere su implementación en áreas de traspatio para el tratamiento de aguas residuales domésticas urbanas. Así mismo, se resalta que esta tecnología tiene potencial aplicación para la biorremediación del agua residual que se genera principalmente en regiones rurales tales como: ranchos, ejidos y fincas agrícolas, donde no existen sistemas de alcantarillado ni plantas de tratamiento de agua residual.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Tapachula por todas las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación. López-Velázquez agradece al programa de estancias posdoctorales por México–CONAHCYT por la beca otorgada (CVU 736037).

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen competencia en intereses financieros ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo que se presenta en este documento.

Referencias bibliográficas

- Al-Wahaibi, B. M., Jafary, T., Al-Mamun, A., Baawain, M. S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Stefanakis, A. I. (2021). Operational modifications of a full-scale experimental vertical flow constructed wetland with effluent recirculation to optimize total nitrogen removal. *Journal of Cleaner Production*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126558>
- Aminsharei, F., Borghei, S. M., Arjomandi, R., Nouri, J., & Pendashteh, A. (2019). Effects of various plants on treatment efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands based on the hydraulic retention time. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(6). <https://doi.org/10.30638/eemj.2019.115>
- APHA, AWWA, WEF. (2012). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2011). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. In *Tropical and Subtropical Agroecosystems* (Vol. 14).
- Lara-Acosta, M., Lango-Reynoso, F., & Castañeda-Chávez, M. del R. (2022). Use of tropical macrophytes in wastewater treatment. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i11.2302>
- López-Velázquez, K., Villanueva-Rodríguez, M., Mejía-González, G., & Herrera-López, D. (2020). Removal of 17 α -ethinylestradiol and caffeine from wastewater by UASB-Fenton coupled system. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1740799>
- Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, 17(1). [https://doi.org/10.1016/s1405-888x\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/s1405-888x(14)70318-3)
- Ma, Y., Zhai, Y., Zheng, X., He, S., & Zhao, M. (2019). Rural domestic wastewater treatment in constructed ditch wetlands: Effects of influent flow ratio distribution. *Journal of Cleaner Production*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.235>
- Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020). Hydroponic technology

as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *In Science of the Total Environment* (Vol. 698). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>

Méndez-Mendoza, A. S., Bello-Mendoza, R., Herrera-López, D., Mejía-González, G., & Calixto-Romo, A. (2015). Performance of constructed wetlands with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of South Mexico. *Water Practice and Technology*, 10(1). <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.013>

Pérez, Y. A., García Cortés, D. A., & Jauregui Haza, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1). <https://doi.org/10.7818/ecos.2279>

SEMARNAT. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. *Diario Oficial de La Federación*.