

TENDENCIAS RECIENTES EN EL DISEÑO DE LOS HUMEDALES DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES Y DOMÉSTICOS

Recent trends in the design of treatment wetlands for industrial and domestic effluents

*María-del-Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa*¹ y Amado-Enrique Navarro-Frómata²*

¹Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. ²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, México.

*mcduran@quimica.unam.mx

RESUMEN

Los humedales actualmente conocidos como de tratamiento (HT) son una opción viable para atenuar las descargas de contaminantes a los ecosistemas, como alternativa para el tratamiento antes o dentro de los humedales naturales. En el presente trabajo se muestra una mini-revisión que abarca literatura 2024-2025. Estos avances se han centrado en acrecentar su eficiencia y eficacia en la depuración de aguas residuales y en el uso de sistemas híbridos combinando sistemas de flujo libre, subsuperficial horizontal y subsuperficial vertical de flujo descendente y ascendente, así como la combinación con otras tecnologías de tratamiento. La remoción asistida por microorganismos para reducir los tiempos de adaptación de los HT o mejorar la remoción de contaminantes, así como la integración de prácticas sostenibles utilizando plantas autóctonas ayudan a promover la gestión comunitaria, y que puede ayudar a la recuperación y preservación de los humedales naturales.

Palabras clave: humedales naturales, humedales de tratamiento, humedales artificiales o construidos, tendencias recientes de diseño y operación.

Keywords: natural wetlands, wetlands treatment, artificial or constructed wetlands, recent in design and operation trends.

INTRODUCCIÓN

El deterioro de los humedales naturales (HN) y la pérdida de los servicios ecosistémicos que prestan es motivo de preocupación para la academia, los tomadores de decisiones y toda la sociedad, lo que requiere de la innovación tecnológica y la adopción de políticas públicas (Navarro-Frómata y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2023; 2024). Entre las medidas que se pueden adoptar para lograr este objetivo está utilizar los de humedales de tratamiento (HT), como barreras protectoras e incluso dentro de los propios HN, como se ha demostrado en la restauración de los humedales en la Florida (Armstrong *y col.*, 2023). El nombre de humedales de tratamiento (HT), fue aceptado en un Congreso Internacional sobre Humedales (noviembre 2024), donde todos los participantes decidieron a adoptar esta designación en español para nombrar a los humedales originalmente conocidos como artificiales o construidos (inglés; *construted*). La restauración en Florida ha detonado el interés valorar las tendencias recientes en el diseño y operación de los HT, que se han centrado en varias áreas clave para mejorar su eficiencia y eficacia en el tratamiento de aguas residuales. En

el presente trabajo se abordan sucintamente las mismas y se ejemplifican con algunos trabajos recientes de 2024 y 2025 para conocer de primera mano las mejoras en el diseño de este tipo de sistemas. Al respecto, Durán-Domínguez *y col.* (2024), y Navarro-Frómata (2015) muestran distintos tipos de humedales de tratamiento (Figuras 1a y 1b), y ejemplo de sus posibles combinaciones, respectivamente. Esta temática es abordada en el libro clásico de Kadlec y Knight (1996), así como por Navarro-Frómata y Durán-Domínguez-de-Bazúa (2023), Bazúa-Rueda *y col.* (2019, Navarro-Frómata y Durán-Domínguez (2019, 2024), entre otros.

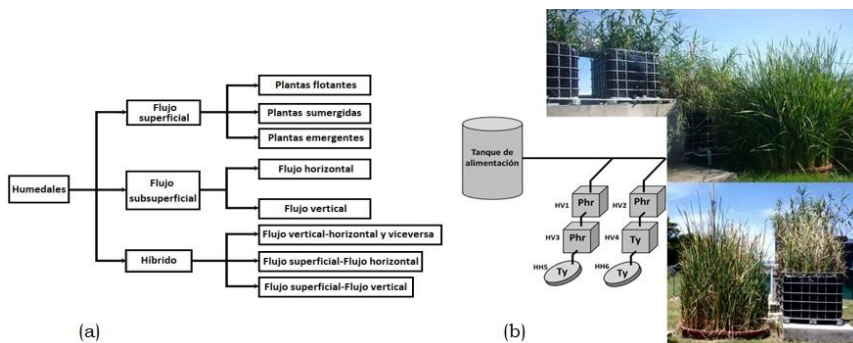


Figura 1. (a) Diseños clásicos de humedales de tratamiento (modificada de David *y col.*, 2023, citado en Durán-Domínguez *y col.*, 2024). (b). Diseño híbrido de humedales de tratamiento de tipo subsuperficial de flujo horizontal (HH) y vertical (HV) en dos líneas en paralelo (L1, L2) con dos especies (Phr=*Phragmites*, Ty=*Typha*) (Tomado de Navarro-Frómata, 2015).

MEJORAS EN LA INGENIERÍA DE DISEÑO

Desde la ingeniería de diseño se pueden mencionar el uso de sistemas con aireación forzada, materiales con capacidades de adsorción mejoradas o específicas, celdas microbianas de combustible y las combinaciones de estas tecnologías. En las referencias bibliográficas de 2024 y 2025 se abordan estas innovaciones, con la posibilidad de aplicarlas como ‘trajes a la medida’ para los casos puntuales de cada situación.

La aireación forzada mejora el tratamiento de aguas residuales al aumentar la concentración de oxígeno disuelto, promoviendo así la actividad microbiana aerobia. Esto, a su vez, acelera la descomposición de la materia orgánica y de contaminantes, incluyendo los compuestos recalcitrantes (Lopopolo *y col.*, 2025). La utilización como material de soporte con capacidad de adsorción mejorada o específica es también una opción atractiva al diseñar los HT. Se destacan: biocarbones, residuos de la siderurgia y cerámicos porosos. En ellos la alta porosidad y la funcionalización de la superficie, como es el caso de los biocarbones, contribuye a incrementar la remoción de los contaminantes (Pandey *y col.*, 2025). El uso combinado de estos materiales ha demostrado ser eficientes en el

tratamiento de aguas residuales de la producción de *whisky* (Cakin *y col.*, 2024). Las celdas de combustible microbianas para la remoción de nitrógeno produciendo energía eléctrica simultáneamente, se consideran alternativas innovadoras (Salinas-Juárez *y col.*, 2024).

USO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Esto abarca la combinación de HT de flujo libre, subsuperficial horizontal y subsuperficial vertical de flujo descendente y ascendente. La combinación de HT verticales con los de flujo libre ha permitido en el tratamiento de aguas industriales remover las demandas química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO), en términos de porcentajes de remoción, entre 69-72% y 72-83%, respectivamente (Bedouh y Hamoud, 2024). Una combinación similar, pero con el HT de flujo superficial libre antes de un HT de flujo subsuperficial, para el tratamiento mejorado de efluentes de provenientes de plantas de aguas residuales, mostró tasas de remoción promedio de nitrógeno amoniacal, de la demanda química de oxígeno y del fósforo total se acercaron al 100%, mientras que la tasa de remoción promedio de nitrógeno total alcanzó el 48,18±1,86%. La información completa sobre el sistema se puede consultar en la referencia de Zhang *y col.* (2025).

COMBINACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

Los HT se combinan con digestores o reactores anaerobios, de electrocoagulación o de membrana, entre otras tecnologías, ubicándolos antes o después de tales sistemas. Por ejemplo, la utilización de un filtro percolador seguido de dos etapas de HT de flujo vertical (Maciejewski *y col.*, 2024), ha demostrado ser eficiente en la remoción de carbono y nitrógeno en el tratamiento de aguas residuales domésticas con eficiencias cercanas al 100% tanto en el otoño como en la primavera. Nuevamente, la información completa sobre el sistema se puede consultar en la referencia. Strugała-Wilczek *y col.* (2024) verificaron la eficacia del tratamiento de aguas residuales provenientes de la gasificación subterránea de carbón, con altas cargas de contaminantes inorgánicos y orgánicos, mediante la combinación de HT con técnicas de adsorción y electrocoagulación (EC). Se probaron cuatro configuraciones: HT, EC/HT, adsorbente/HT y EC/adsorbente/HT en experimentos de 60 días de duración. La mayor eficiencia se observó para la remoción de los hidrocarburos aromáticos policíclicos, BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) y los fenoles, lográndose una disminución apreciable de la toxicidad de los efluentes. La disposición u organización de dos sistemas basados en la naturaleza junto con los fotobiorreactores y los HT permite aprovechar la actividad de plantas, microorganismos (algas, bacterias), y sustratos naturales, para eliminar los contaminantes, ofreciendo una alternativa para pequeñas comunidades rurales y también para zonas urbanas densamente pobladas. La ubicación del HT después de los fotobiorreactores ayuda a compensar la limitación de estos últimos al tratar efluentes industriales con altas cargas orgánicas y alta turbidez, logrando hasta un 80% de remoción de la materia orgánica (Sátiro *y col.*, 2025).

REMOCIÓN ASISTIDA POR MICROORGANISMOS

La utilización de microorganismos para reducir los tiempos de adaptación de los HT o mejora de la remoción de contaminantes es un campo novedoso en la tecnología de los HT. Aunque la bioaugmentación en forma de micorrización artificial de raíces de plantas e inoculación bacteriana es un enfoque prometedor para mejorar el funcionamiento de los humedales construidos (HT), considerando que los microorganismos son el principal impulsor de los procesos de degradación de contaminantes, aún no se utiliza en toda su potencialidad (Tondera *y col.*, 2025). Los hongos micorrízicos arbusculares pueden atenuar los efectos negativos de las microesferas de polietileno y las microfibras de poliéster atenuando los efectos negativos de estos microplásticos en las comunidades microbianas de los HT, aumentando su resiliencia (Kraj *y Chen*, 2025).

INTEGRACIÓN DE PRÁCTICAS SOSTENIBLES

Esto incluye aspectos muy diversos que van desde el uso de plantas autóctonas hasta la inserción de los HT en el entorno urbano y la gestión comunitaria de la operación de estos sistemas. La edad del humedal es un factor que afecta el rendimiento del tratamiento de N y P. La sucesión natural de las comunidades vegetales se produce debido a las diferentes tolerancias y capacidades reproductivas de las distintas especies vegetales. La topografía del fondo del humedal cambia con la resuspensión y la deposición. Los ensamblajes y el metabolismo microbianos varían con el O₂, el pH, la temperatura, los nutrientes disponibles, las superficies para el crecimiento de la biopelícula y la profundidad del agua. En la madurez, las relaciones entre plantas, sedimentos y sus conjuntos microbianos asociados difieren de los humedales jóvenes. Por ello, los resultados de los estudios en HT jóvenes no deben utilizarse para predecir el comportamiento de los sistemas al alcanzar la madurez, siendo crucial optimizar la selección de las plantas emergentes que se utilizan (Shu *y col.*, 2024). Wu *y col.*, (2024) enfatizan en la importancia profundizar los estudios de los HT de flujo superficial que combinan plantas emergentes y flotantes. La inserción de un tratamiento de aguas grises *in situ* o descentralizado en edificios sostenibles que utilizan HT de flujo vertical permite ahorrar hasta un 30% de agua potable, reutilizar el agua tratada en los servicios habitacionales y remover con eficiencia los productos del cuidado personal (Muniz-Sacco *y col.*, 2024).

CONSIDERACIONES FINALES

Es usual experimentar con cualquier innovación a pequeña escala (usualmente a nivel de mesocosmos), antes de escalar a sistemas de mayores proporciones. Para ello es necesario tener en cuenta algunas cuestiones (Brisson *y col.*, 2024): (1) Los experimentos a pequeña escala son esenciales para investigar los mecanismos que operan en estos sistemas de tratamiento. Sin embargo, debido a limitaciones financieras, de espacio o de recursos, es fundamental en la etapa de planificación determinar cuidadosamente un compromiso adecuado entre: Tamaño y cantidad de unidades, y de

tratamientos, así como el número de variables y de testigos a analizar, (2) La producción, el almacenamiento adecuado y la distribución rigurosa del volumen o caudal de aguas residuales para cada unidad de tratamiento, a menudo es el aspecto más desafiante, que requiere más tiempo y esfuerzo, (3) Se deben tener en cuenta los posibles sesgos antes de poder aplicar los resultados a sistemas a gran escala y (4) Para terminar, la Figura 2 muestra un ejemplo histórico del uso de los humedales para el tratamiento y producción alimentos en el Gran *México-Tenochtitlan*, que implicaba la convivencia y protección de la naturaleza.



Figura 2. Pictograma de la capital del imperio *mexica* construida sobre los islotes de varios lagos formados en una cuenca endorreica con ríos y manantiales de las montañas circundantes. (Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/>).

LITERATURA CITADA

- Armstrong, C., T. Piccone y J. Dombrowski. 2023. The largest constructed treatment wetland project in the world: The story of the Everglades stormwater treatment areas. *Ecological Engineering* 193(107005), 107005.
- Bazúa-Rueda, E.R., M. Bernal-González, M.I. Cano-Rodríguez, M.d.C. Durán-Domínguez-de-Bazúa, B. Espinosa-Aquino, R.S. García-Gómez, J.A. Herrera-Cárdenas, U. Kappelmeyer, A.E. Navarro-Frómata, L.I. Ramírez-Burgos, N.J. Ruiz-Cárdenas, M. G. Salinas-Juárez, I. Salgado-Bernal, S. A. Sánchez-Tovar y J.A. Solís-Fuentes. 2019. Aplicaciones de la química al tratamiento de aguas residuales: Casos de estudio en México y Cuba. *Revista Cubana de Química* 105-133.
- Bedouh, Y. y F. Hamoud. 2024. Efficiency of a hybrid constructed wetland system in treating industrial wastewater: a path to sustainable phytoremediation and agricultural reuse. (p. 15). En: *Fifth International Conference on Green Energy, Environment, and Sustainable Development* (GEESD (Aghaei, M., H. Ren y X. Zhang eds.)). SPIE.
- Brisson, J., P. Carvalho, O. Stein, K. Weber, H. Brix, Y. Zhao y F. Zurita. 2024. Small-scale experiments: Using mesocosms and microcosms for testing hypotheses in treatment wetland research. *Ecological Engineering* 208 (107378).
- Cakin, I., B. Morrissey, L. Marcello, P.P.J. Gaffney, S. Pap y M.A. Taggart. 2024. A comparison between constructed wetland substrates: Impacts on microbial community and wastewater treatment. *Chemosphere* 364 (143179).
- David, G., M.S. Rana, S. Saxena, S. Sharma, D. Pant y S.K. Prajapati. 2023. A review on design, operation, and maintenance of constructed wetlands for removal of nutrients and emerging contaminants. *International Journal of Environmental Science and Technology* 20(8):3.
- Durán-Domínguez, M.d.C., C. Leyva-Inzunza y A.E. Navarro-Frómata. 2024. Avances en la remoción de microcontaminantes orgánicos con humedales de tratamiento: Una mini-revisión. *Ambiens Techné et Scientia México* 12(2):165-178.
- Kadlec, R.H. y R.L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Pub. NY.

- Kralj, K. y Z. Chen. 2025. Arbuscular mycorrhizal fungi improve treatment performance and vegetative resilience in constructed wetlands exposed to microplastics. *Environmental Research* 270 (121049).
- Lopopolo, L., J.A. Herrera-Melián, D. Arocha-Espiau, I. Naghoum, E. Ranieri, R. Guedes-Alonso y Z. Sosa-Ferrera. 2025. Upgrading a horizontal surface flow constructed wetland with forest waste and aeration. *Journal of Environmental Management* 376(124468).
- Maciejewski, K., M. Gautier, B. Kim, P. Michel, P. Molle y R. Gourdon. 2024. Performance of carbon and nitrogen removal in a system combining an aerobic trickling filter followed by two stages of vertical flow treatment wetland. *Ecological Engineering* 209 (107409).
- Muniz-Sacco, F.C., S. Venditti, P. Wilmes, H. Steinmetz y J. Hansen. 2024. Vertical-flow constructed wetlands as a sustainable on-site greywater treatment process for the decrease of micropollutant concentration in urban wastewater and integration to households' water services. *The Science of the Total Environment* 946(174310).
- Navarro-Frómata, A.E. 2015. Remoción de microcontaminantes orgánicos de baja masa molecular en humedales construidos híbridos. En Libro final del Sexto Seminario Internacional de Ex-Becarios del DAAD de Alemania sobre Ingeniería Verde en Honor del Dr. Peter Kuschik. Junio 5, 2015. Pp. 31-38. México D.F.
- Navarro-Frómata, A.E. y M.d.C. Durán-Domínguez. 2019. El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: Los humedales construidos, una tecnología a considerar. *Revista Cubana de Química* 87-104.
- Navarro-Frómata, A.E. y M.d.C. Durán-Domínguez-de-Bazúa. 2024. Los humedales, políticas a seguir para su rescate. *RD-ICUAP* 10(28):70-91.
- Navarro-Frómata, A.E. y M.d.C. Durán-Domínguez-de-Bazúa. 2023. Los humedales, un día de celebración y 364 días y un cuarto de trabajo para su rescate, una reseña histórica 1ª edición (Febrero 2).
- Pandey, D., S.V. Singh, N. Savio, J.K. Bhutto, R.K. Srivastava, K.K. Yadav, R. Sharma, T.M.K. Nandipamu y B. Sarkar. 2025. Biochar application in constructed wetlands for wastewater treatment: A critical review. *Journal of Water Process Engineering* 69(106713).
- Salinas-Juárez, M.G., B.V. Acevedo-Dorantes y M.d.C. Durán-Domínguez-de-Bazúa. 2024. Especies de nitrógeno en un humedal artificial asistido electroquímicamente a escala de laboratorio. *Ambiens Techné et Scientia México* 12(2):151-164.
- Sátiro, J., L. Marchiori, M.V. Morais, T. Marinho, L. Florencio, A. Gomes, R. Muñoz, A. Albuquerque y R. Simões. 2025. Integrating photobioreactors and constructed wetlands for paper pulp industry wastewater treatment: A nature-based system approach. *Journal of Water Process Engineering* 71(107237).
- Shu, Y., Y. Cui, C. Guo, B. Liao, M. Xiang y B. Zhang. 2024. Improving treatment performance in mature wetlands: The impact of emergent plant species. *Ecological Engineering* 206(107325).
- Strugała-Wilczek, A., L. Jałowiecki, M. Szul, J. Borgulat, G. Plaza y K. Stańczyk. 2024. A hybrid system based on the combination of adsorption, electrocoagulation, and wetland treatment for the effective remediation of industrial wastewater from underground coal gasification (UCG). *Journal of Environmental Management* 371(123180).
- Tondera, K., P.L. Chagnon y J. Brisson. 2025. Bioaugmentation in constructed wetlands for performance enhancement. En: *Emerging Developments in Constructed Wetlands*. Elsevier. pp. 551-577.
- Wu, W., X. Hu, H. Xie, Z. Hu, S. Liang y Z. Guo. 2025. Treatment of total petroleum hydrocarbon by free water surface constructed wetland: Effects of different combinations of submerged and free-floating plants. *Desalination and Water Treatment* 321(100908).
- Zhang, Q., T. Zhao, Y. Xie, H. Zhang, X. C. Wang y M. Dzakpasu. 2025. Impact of operating mode variability on pollutant removal and microbial dynamics in a stacked hybrid constructed wetland: Implications for performance optimization. *Chemosphere* 372 (144130).