

Humedales artificiales: una alternativa de bajo costo para tratar aguas residuales

Alejandro Sandoval Silva¹ y Efraín Neri Ramírez^{1*}

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias. Universidad Autónoma de Tamaulipas,

* Dirección para correspondencia: eneri@docentes.uat.edu.mx

México enfrenta una crisis hídrica creciente que podría agravarse significativamente en los próximos años, afectando tanto a zonas rurales como a grandes ciudades (Méndez *et al.*, 2022). Esta problemática se intensifica debido a una profunda desigualdad geográfica en la disponibilidad del recurso. Mientras que en ciertas regiones del sur la lluvia es tan abundante que sobrepasa los 4,000 mm anuales, el noroeste se mantiene como la zona más árida, con registros de lluvia que apenas alcanzan una lámina de 300 mm al año (Arreguín-Cortés *et al.*, 2020). Aunado a lo anterior, las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua receptores (superficiales o subterráneas) impiden su aprovechamiento para otras actividades ya que comprometen la cantidad y calidad destinada al uso público urbano, así como otras actividades económicas (Zamora *et al.*, 2025). Por esto es fundamental entender que depurar estas aguas no solo protege el medio ambiente, sino que puede asegurar la disponibilidad del recurso hídrico a largo plazo.

Frente a este complejo panorama, los humedales artificiales plantean una alternativa prometedora. En estos sistemas, las plantas absorben y metabolizan los contaminantes presentes en el agua; son fáciles de operar y requieren poco

mantenimiento (Delvalle-Borrero *et al.*, 2022). Más allá de su eficacia en la depuración, los humedales artificiales representan una solución amigable con el medio ambiente, de bajo costo y con beneficios para el paisaje, la sociedad y el entorno natural, lo cual los hace atractivos para su implementación como primer tratamiento de aguas residuales con miras a ser reutilizadas (Méndez *et al.*, 2022).

¿Qué son los humedales artificiales y cómo funcionan?

Los humedales artificiales están basados en la depuración natural que ejercen los ríos; es decir, se trata de una ingeniería que copia a la naturaleza. Deben considerarse como filtros donde las plantas y los microbios trabajan juntos para limpiar el agua. Son, en sí mismos, una técnica de fitorremediación (Quevedo, 2021), lo que quiere decir que se aprovecha el poder natural de las plantas para sanear el ambiente. Algunos estudios reportan que las plantas ayudan en la remoción de nutrientes, la fitodesalinización y los tratamientos secundarios antes de su descarga en ríos, así como en el tratamiento de efluentes industriales y contaminación por metales pesados (Delvalle-Borrero *et al.*, 2022).

Componentes clave

Los humedales artificiales están formados por cuatro elementos esenciales que trabajan en conjunto (Alarcón *et al.*, 2018):

1. *Influente*: es el agua residual que necesita ser tratada; puede provenir de hogares, industrias, o incluso ser una mezcla que incluye agua de lluvia.
2. *Sustrato*: es la base o filtro del humedal, compuesto por materiales como arena, grava o rocas. Su naturaleza permeable permite el flujo del agua y sirve de soporte para las plantas y microorganismos. La grava de aproximadamente 5 mm de diámetro es un material ideal para esta función.
3. *Vegetación*: son las plantas que se siembran en el humedal. No están ahí solo por decoración; algunas especies se utilizan para eliminar, destruir o secuestrar contaminantes mediante la fitorremediación. Se seleccionan por sus propiedades, como la evapotranspiración, la producción de enzimas, la tasa de crecimiento y cosecha, la profundidad y longitud de sus raíces, la capacidad para bioacumular contaminantes, la disponibilidad y cantidad de especies, el área de tratamiento y el interés estético o comercial (Delvalle-Borrero *et al.*, 2022; Alarcón *et al.*, 2018).
4. *Microorganismos*: invisibles a simple vista, pero fundamentales. Son una comunidad de seres vivos que habitan en el sustrato y en las raíces de las plantas. Son los encargados de llevar a cabo las reacciones biológicas que descomponen y transforman los contaminantes en el agua.

El proceso de tratamiento

El proceso de descontaminación del agua se da a medida que esta fluye a través del humedal. Primero, los sólidos suspendidos se remueven por sedimentación y filtración. Luego, la materia orgánica se descompone gracias a la acción de los microorganismos. Se eliminan microorganismos patógenos a través de la filtración y la acción de otros organismos. Además, se tiene evidencia de que el sistema logra la translocación de los metales pesados mediante procesos de fitorremediación; existen al menos 14 especies vegetales a las cuales se les puede atribuir dicha capacidad (Ang *et al.*, 2023). Las plantas contribuyen significativamente al proceso al absorber los nutrientes químicos y orgánicos del agua, lo que resulta en un agua de mejor calidad y un ecosistema más saludable (Quevedo, 2021).

¿Para quién son y dónde se usan?

Los humedales artificiales vienen en diferentes modelos o configuraciones, lo que les permite adaptarse a diversas necesidades. Entre ellos podemos encontrar los de flujo superficial, que son similares a los humedales naturales, los cuales se basan en una laguna o canales de poca profundidad por los que se desplaza el agua sobre el sustrato. También existen los de flujo subsuperficial, en los que el agua fluye a través del sustrato; dentro de estos existen dos variantes: los de flujo horizontal y los de flujo vertical (Alarcón *et al.*, 2018).

Pueden tratar eficientemente una gran variedad de aguas residuales, incluyendo las de origen doméstico, algunas provenientes de la industria, y los escurrimientos agrícolas. Incluso se ha considerado su uso para tratar aguas salobres, demostrando su amplio rango de aplicación (Alarcón *et al.*, 2018; IANAS y UNESCO, 2015).

Los humedales artificiales son una excelente opción para comunidades rurales, donde los sistemas de tratamiento convencionales suelen ser costosos y poco viables (Méndez *et al.*, 2022). Son muy adecuados para comunidades semirurales, periurbanas y urbanas de tamaño pequeño y mediano, ofreciendo una solución de tratamiento duradera. Aunque la disponibilidad de terreno puede ser un factor limitante para grandes ciudades, se han implementado humedales de gran extensión en lugares como Mexicali y San Luis Potosí para tratar volúmenes considerables de agua, sirviendo incluso como refugios de vida silvestre, especialmente para aves migratorias (Rivas, 2021).

Una de las grandes ventajas es la posibilidad de reusar el agua una vez tratada. Ante el cambio climático y la creciente escasez, la reutilización del agua residual es una prioridad (IANAS y UNESCO, 2015). Además, la vegetación cultivada en los humedales puede tener un valor económico, al ser usada como materia prima para biocombustibles, alimento para animales, o para la producción de especies ornamentales y artesanales, promoviendo así el reciclaje de nutrientes y aportando valor añadido (Alarcón *et al.*, 2018; Rivas, 2021).

La ventaja de los humedales: costo y mantenimiento

Los humedales artificiales son una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, lo que los hace muy atractivos frente a las plantas de tratamiento convencionales. Son significativamente más económicos de implementar porque requieren menos infraestructura compleja y aprovechan procesos naturales, lo que a su vez reduce los altos consumos de energía asociados a los sistemas electromecánicos (Méndez *et al.*, 2022; Rivas, 2021). Es importante mencionar que una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) industrial (como un sistema de lodos activados) requiere reactores de concreto armado, sopladores de aire y sistemas de bombeo complejos, mientras que los humedales artificiales utilizan materiales locales (grava, arena o incluso plástico PET reciclado) y excavaciones simples, lo que reduce considerablemente el gasto de capital. Por otro lado, la mayoría de los humedales artificiales operan por gravedad; al no requerir aireación mecánica ni bombeo constante, el costo operativo disminuye drásticamente (Marín-Muñoz *et al.*, 2022). La facilidad de implementación y bajo costo inicial son parte de las razones por las que la fitorremediación, base de los humedales artificiales, es tan valorada (Quevedo, 2021).

Estos sistemas sobresalen por ser económicos y fáciles de mantener en el día a día. Las PTAR convencionales suelen tener un gasto constante en energía o productos químicos; en cambio, los humedales operan sin estas exigencias operativas tan altas. Según señala Rivas (2021), gracias a que su manejo es tan

simple, se convierten en opciones duraderas que realmente se adaptan a las necesidades de diversas comunidades sin generar una carga financiera pesada.

Ya no es suficiente con buscar agua; es urgente encontrar formas sostenibles de tratar la que ya usamos. Es en este punto donde los humedales artificiales dejan de ser una simple opción técnica para convertirse en una herramienta de gran valor social y ambiental. Sus elementos de construcción (influyente, sustrato, vegetación y microorganismos) los hacen eficientes en la remoción de contaminantes (Alarcón *et al.*, 2018; Méndez *et al.*, 2022). Gracias a su versatilidad, pueden tratar desde aguas domésticas hasta diversos desechos de la industria o la agricultura. Por ello, resultan ideales para comunidades rurales o pequeñas, donde construir y mantener plantas convencionales suele ser costoso y poco viable (Méndez *et al.*, 2022; Rivas, 2021; IANAS y UNESCO, 2015). Al no requerir personal experto ni gastos operativos altos, su mantenimiento resulta sencillo y accesible. Es una tecnología que, además, permite reutilizar el agua para riego o incluso generar ingresos con la vegetación, ayuda a reciclar nutrientes y mejora la imagen del paisaje (Alarcón *et al.*, 2018; Rivas, 2021). Quizás su mayor desventaja sea que necesitan suficiente espacio, algo que dificulta su uso como sistemas centrales en grandes ciudades. Aun así, casos exitosos como los de Mexicali y San Luis Potosí, donde funcionan como refugio para la fauna local, prueban que tienen un gran potencial incluso en zonas urbanas (Rivas, 2021).

Conclusión

El tratamiento de aguas residuales debe dejar de considerarse una opción y convertirse en una prioridad estratégica para proteger la salud pública y los ecosistemas. Los humedales artificiales ofrecen una solución efectiva y sostenible debido a su probada capacidad para eliminar contaminantes mediante procesos naturales, y promueven el aumento de la disponibilidad de agua en el largo plazo. Finalmente, es de suma importancia implementarlos, ya que al hacerlo se fomentará un avance práctico hacia un sistema de gestión del agua más eficiente, que traerá consigo beneficios ambientales, así como también la protección de la salud humana.

Referencias

Alarcón Herrera MT, Zurita Martínez F, Hadad F *et al.* (2018). Humedales de tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

Ang SY, Goh HW, Mohd Fazli B *et al.* (2023). Heavy metals removal from domestic sewage in batch mesocosm constructed wetlands using tropical wetland plants. *Water* 15:1-18.

Arreguín-Cortés FI, López-Pérez M y Cervantes-Jaimes CE (2020). Los retos del agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 11:341-371.

Delvalle-Borrero DM, Medina JR y Fuentes K (2022). Humedales artificiales flotantes y su valor paisajista en ríos urbanos-Ciudad de Panamá. *Prisma Tecnológico* 13:3-9.

IANAS y UNESCO (2015). Desafíos del agua urbana en las Américas: Perspectivas de las Academias de Ciencias. Red Interamericana de Academias de Ciencias; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Marín-Muñiz JL, Sandoval Herazo LC, Zamora-Castro SA y Celis-Pérez MC (2022). Humedales con plantas ornamentales y relleno de plástico reutilizado como tratamiento sustentable de aguas residuales. *Journal of Basic Sciences* 8(23):146-153.

Méndez GM, Lara de la Callejo MA y López Aguilar RC (2022). Propuesta de humedal artificial como alternativa sustentable para el cuidado del medio ambiente. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan* 10:219–238.

Quevedo Quispe AW (2021). Diseño y construcción de humedal artificial para la recuperación de aguas residuales en la población de Alcalá. *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación* 19:133–148.

Rivas Hernández A (2021). Reflexión sobre las causas que limitan el uso de humedales de tratamiento en México. *Perspectivas IMTA* 9:1–4.

Zamora Torres AI, Pérez Galindo JS y Leco Tomás C (2025). Eficiencia de las sanciones por descargas de aguas residuales en Michoacán, México (2022). Un estudio a través del Análisis Envolvente de Datos (DEA) con presencia de bad outputs. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente* 16:A-002.