

# REVISIÓN DEL POTENCIAL DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y TEXTILES COMO SUSTRATO EN HUMEDALES ARTIFICIALES

## *Review of the potential of organic and textile waste as substrates in constructed wetlands*

Diego Domínguez-Solís<sup>1</sup>, María Concepción Martínez-Rodríguez<sup>2\*</sup>, Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla<sup>3</sup>

\*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.250](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.250)

Como citar este artículo: Domínguez-Solís, D., Martínez-Rodríguez, M. C. y Ramírez-Escamilla, H. G. (2026). Revisión del potencial de los residuos orgánicos y textiles como sustrato en humedales artificiales. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 166-189. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.250>

## Resumen

El uso de residuos textiles y orgánicos como materiales alternativos a emplear como sustrato en humedales artificiales (HA) se ha convertido en una tendencia sustentable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. A través de una revisión sistemática de la literatura, se analizaron 49 artículos científicos publicados entre 2010 y 2024, los cuales se obtuvieron de las bases de datos Scopus y Web of Science. El análisis se enfocó en identificar los residuos utilizados, sus características y la eficiencia de remoción. Los resultados revelan un creciente interés en el uso de materiales no convencionales, especialmente cáscaras, aserrín, bagazo y olote, así como de otros desechos orgánicos, entre ellos, compost o lodos estabilizados, sin destacar el uso de textiles debido a sus diferentes implicaciones. Estos materiales mostraron una adecuada porosidad, capacidad de adsorción y compatibilidad con el crecimiento vegetal y el desarrollo de comunidades microbianas. Como resultado, encontramos que estos sustratos alcanzaron eficiencias de remoción de 80-85% de demanda biológica de oxígeno (DBO5), 70-80% de demanda química de oxígeno (DQO), 82-95% de nitrógeno y 80-85% de fósforo, comparables

---

1 Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>. Correo electrónico: diegossolis32@gmail.com

2 Doctora en Política Pública. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>. Correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx

3 Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-4644>. Correo electrónico: ramzhector153@gmail.com

Recibido: 21/01/2026 | Aceptado: 03/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

e incluso superiores a las logradas con materiales tradicionales como grava, arena o tezontle. En conclusión, su beneficio no sólo involucra la remoción de contaminantes sino también la disminución de costos en la construcción de HA y el fortalecimiento de estrategias de economía circular.

**Palabras clave:** desarrollo sustentable, medio ambiente, recursos naturales (Thesaurus); humedales artificiales, sustrato (palabras del autor).

## **Abstract**

Textile and organic waste as alternative materials for substrates in constructed wetlands (CWs) have become a sustainable trend for decentralized wastewater treatment. Through a systematic literature review, 49 scientific articles published between 2010 and 2024 were analyzed, retrieved from the Scopus and Web of Science databases. The analysis focused on identifying the types of waste used, their characteristics, and pollutant removal efficiency. The results reveal a growing interest in the use of non-conventional materials, particularly shells, sawdust, bagasse, corn cobs, and other organic wastes such as compost or stabilized sludge, while the use of textiles is less frequently highlighted due to their different implications. These materials exhibited adequate porosity, adsorption capacity, and compatibility with plant growth and the development of microbial communities. As a result, these substrates achieved removal efficiencies of 80–85% for biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), 70–80% for chemical oxygen demand (COD), 82–95% for nitrogen, and 80–85% for phosphorus, which are comparable to or even higher than those achieved with traditional materials such as gravel, sand, or tezontle. In conclusion, their benefits involve not only pollutant removal but also reduced construction costs of CWs and the strengthening of circular economy strategies.

**Keywords:** Sustainable development, environment, natural resources (Thesaurus); constructed wetlands, substrate (author keywords).

## **Introducción**

El tratamiento descentralizado de aguas residuales representa una oportunidad creciente en contextos urbanos y rurales, especialmente ante el aumento del estrés hídrico y los limitados recursos para el manejo de plantas de tratamiento de aguas residuales (Santos et al., 2024). En este contexto, los humedales artificiales (HA) han demostrado ser una solución sustentable, eficaz y

de bajo costo para la depuración de aguas domésticas e industriales, en tanto simulan procesos físicos, biológicos y químicos mediante la interacción entre el sustrato, la vegetación y los microorganismos, pudiendo emplearse más de 40 tipos de especies de plantas y 30 diferentes soportes de relleno (Lin et al., 2025).

De acuerdo con Pinho y Matheus (2021), los humedales artificiales promueven y contribuyen a la economía circular, fomentando el reciclaje del agua y el uso de posibles residuos orgánicos como sustrato. Tradicionalmente, los sustratos utilizados en HA han sido de origen inorgánico, como grava, arena o tezontle. En años recientes ha crecido la investigación sobre el uso de materiales alternativos, particularmente residuos orgánicos y textiles reciclados, como opciones viables y ambientalmente responsables (Kivaisi y Zhao, 2024; Agaton et al., 2024). Estos residuos pueden aportar propiedades beneficiosas, como alta porosidad, mayor retención de humedad que los sustratos tradicionales, mayor capacidad de adsorción y una mayor área para la actividad microbiana, sin comprometer la eficiencia de remoción de contaminantes, el buen funcionamiento y la calidad del agua tratada (Yang et al., 2022).

El aprovechamiento de residuos —cáscaras, bagazo, fibras vegetales, olote y textiles posconsumo— como medios filtrantes en HA han cobrado relevancia por su bajo costo, lo cual impulsa los modelos de economía circular (Saeed et al., 2022; Irshad et al., 2024). El presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2010 y 2025 que se centra en el uso de residuos orgánicos y textiles como sustrato en humedales artificiales, evaluando su eficiencia de remoción, la vegetación asociada y los beneficios ambientales derivados. La finalidad es generar un antecedente que promueva la utilización de estos materiales, comúnmente considerados sin un segundo uso, para contribuir a reducir su inadecuada disposición final y a disminuir los costos de construcción de estos sistemas.

## **Marco teórico**

### **Definición de los humedales artificiales**

Los humedales naturales son zonas inundadas con cierta frecuencia para mantener condiciones de saturación de suelo durante gran parte del año. Esto permite el crecimiento de vegetación específica y propicia condiciones para diferentes tipos de fauna (Paredes, 2007 y Reed et al., 1995). En este sentido, Vymazal (2014) menciona que los humedales artificiales son sistemas que

imitan procesos naturales que ocurren en los humedales naturales e implican el uso de plantas acuáticas, material de relleno y agua. Gómez (2021) enfatiza que su estructura es similar a la de un estanque de poca profundidad, en el que el sustrato ocupa la mayor parte de su volumen y sirve como soporte de plantas ornamentales. Por lo tanto, podemos decir que los humedales artificiales son humedales construidos por el hombre en los que existen procesos de depuración de los contaminantes presentes en aguas residuales. Por ello es importante su uso adecuado y su conservación (Junca-Gómez et al., 2024). Los humedales artificiales buscan replicar los procesos de descomposición que ocurren en los humedales naturales. Su estructura se compone principalmente de plantas acuáticas, microorganismos y material de relleno, lo que los convierte en una posible herramienta educativa como, según Fontalvo-Buelvas (2023), lo son los huertos escolares que, además, con las políticas públicas adecuadas, pueden ser implementados como un ejercicio de restauración (Escobar, 2025). El uso de esta alternativa pretende replicar procesos naturales y aprovechar los factores bióticos para la depuración de los contaminantes presentes en el agua residual. El desarrollo de esta ecotecnología abona a aumentar la disponibilidad de agua y a neutralizar el estrés hídrico y la pérdida de biodiversidad (Hu et al., 2022; Latip et al., 2022; López-Rosas et al., 2024; Sun et al., 2019).

### **Tipos de humedales artificiales y eficiencia en la remoción de contaminantes**

Los humedales construidos son sistemas diseñados e implementados para tratar aguas residuales imitando los mecanismos de filtración, sedimentación y degradación biológica que ocurren en los humedales naturales. Se clasifican en sistemas de flujo subsuperficial horizontal (HSSF), subsuperficial vertical (VSSF), de flujo superficial libre (FWS) o sistemas híbridos que combinan dos o más tipos de configuraciones (Wang et al., 2018; Andreo-Martínez et al., 2016; De Souza et al., 2024). Estos sistemas han demostrado ser eficaces en la remoción de diferentes contaminantes (DBO, DQO), nutrientes (nitrógeno, fósforo), metales pesados y patógenos, con eficiencias que varían entre 60% y 95% dependiendo del diseño y las condiciones operativas (Khalifa et al., 2020). Además, se destacan por su bajo consumo energético, la facilidad de operación y mantenimiento, así como por la posibilidad de ser integrados a entornos urbanos (Nuamah et al., 2022).

### **Materiales orgánicos y reciclados como sustrato en HA**

En un HA el sustrato sirve como soporte físico para la vegetación, las comu-

nidades microbianas y facilita la transferencia de oxígeno. En años recientes, diversas investigaciones han estudiado residuos orgánicos y textiles reciclados como sustitutos complementarios o totales de los materiales tradicionales, por ejemplo, tezontle, gravilla, carbón activado, etc. (Ji et al., 2021; Wang et al., 2019). Entre los materiales que han sido empleados como sustratos en los últimos años figuran: bagazo de caña, cáscaras de arroz, aserrín, turba, compost, biochar, fibras de coco y mezclas textiles (principalmente algodón y poliéster), los cuales han demostrado propiedades favorables, como alta superficie específica, capacidad de adsorción de nutrientes y metales, y buena compatibilidad con especies de vegetación acuática (Saeed et al., 2013; Nata et al., 2024).

### **Función del sustrato en los humedales artificiales**

El sustrato constituye uno de los componentes clave en los HA, no sólo como medio físico para el soporte de las raíces de las plantas, sino también como actor en los procesos de adsorción, precipitación, filtración y actividad microbiana; su estructura, composición, área superficial específica, conductividad, porosidad y capacidad de retención hidráulica influyen directamente en la eficiencia del tratamiento (Wang et al., 2024; Patyal et al., 2024). En el diseño de HA normalmente se consideran materiales como grava, arena o tezontle, que ofrecen buena estabilidad estructural, pero cuya capacidad de adsorción de nutrientes o metales pesados suele ser limitada (Cui et al., 2008). Por otro lado, materiales orgánicos y reciclados como biochar, bagazo de caña, aserrín, fibras textiles o compost muestran una mayor interacción química con los contaminantes, debido a que coexiste un mayor número de grupos funcionales y a su alta superficie específica (Kong et al., 2022; Gross et al., 2020).

### **Materiales y métodos**

El presente trabajo es una revisión bibliográfica sobre el potencial de los residuos orgánicos y textiles para ser usados como sustrato en humedales artificiales sin discriminar su impacto. Para la selección de los trabajos de investigación se realizó la búsqueda de las siguientes palabras clave: “constructed wetland”, “organic substrates” y “textile” en la base de datos de Scopus y Web of Science. Posteriormente se analizaron los resultados, en especial de aquellos artículos realizados en el periodo 2010-2025. La búsqueda se limitó al idioma inglés.

Se llevaron a cabo dos análisis: bibliométrico y comparativo. En el primero, a partir del análisis llevado a cabo en Vosviewer versión 1.6.17 (Van Eck y Walt-

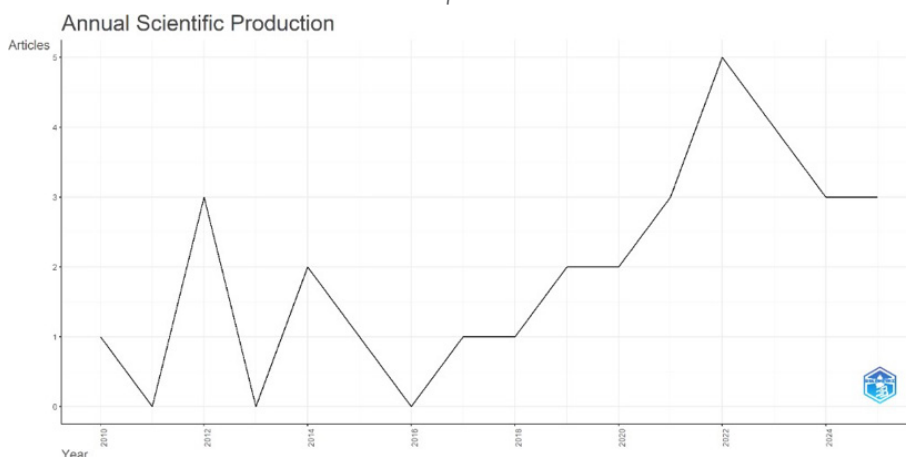
man, 2021) se obtuvo un mapa de concurrencia y uno de densidad de acuerdo con las principales palabras y su fuerza de correlación. Se eliminaron las palabras repetidas de forma plural o singular; además, con el uso de bibliometrix se obtuvo una representación gráfica que muestra la producción de trabajos sobre sustratos orgánicos en humedales artificiales a lo largo del tiempo. Para el segundo análisis se recuperó información sobre el tipo de sustrato utilizado y su eficiencia en la remoción de contaminantes en el agua tratada, con el fin de discutir los resultados encontrados resaltando aquellos que pueden generar mayor impacto. Se analizan los diferentes artículos obtenidos con el propósito de recopilar los avances en el estudio de esta área.

## Resultados

De acuerdo con la metodología se seleccionaron 49 artículos producidos en el periodo 2010-2025. A partir de 2020 se observa un aumento significativo en la producción sobre este tema, como se muestra en la figura 1. Del total de artículos, más de 70% corresponde a los últimos seis años. Hasta ahora los años 2022, 2023 y 2024 han sido los años en que se ha producido mayor cantidad de artículos.

**Figura 1.**

*Producción científica anual sobre el uso de sustratos en humedales artificiales encontrados en la base de datos de Scopus*



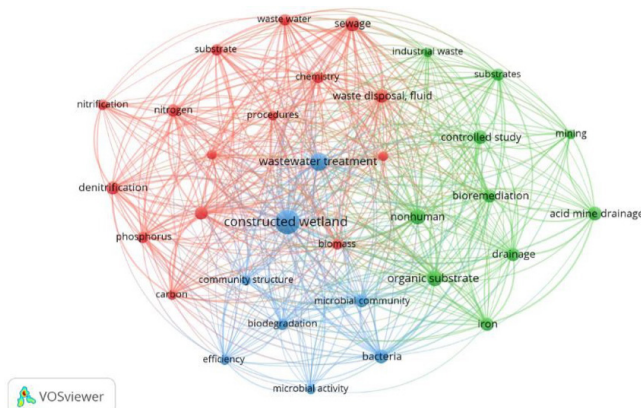
La figura 2 muestra que el clúster azul gira en torno al término “constructed wetland” y su conexión con palabras como “efficiency”, “biodegradation”, “bac-

teria”, “microbial community”. Este grupo refleja la importancia de los procesos microbiológicos en la operación de los humedales artificiales, destacando el papel central del sustrato como soporte físico y de interacción química para las comunidades microbianas. Dichas comunidades participan de manera activa en la degradación de materia orgánica y otros contaminantes, por lo que la elección del sustrato influye directamente en la eficiencia global del sistema.

- Clúster rojo: enfocado en la remoción de nutrientes, resalta el papel de los sustratos como catalizadores de procesos biogeoquímicos (nitrificación, desnitrificación), esenciales para eliminar nitrógeno y fósforo. En este contexto, los residuos orgánicos y textiles emergen como alternativas viables para sustituir o complementar medios tradicionales.
- Clúster azul: centrado en la ecología microbiana, evidencia la relación directa entre el tipo de sustrato y la actividad de comunidades microbianas responsables de la biodegradación y la eficiencia del sistema. Los materiales orgánicos y textiles ofrecen ventajas al favorecer la colonización y diversificación microbianas.
- Clúster verde: orientado a aplicaciones de biorremediación en escenarios industriales y de alta contaminación, donde los sustratos alternativos adquieren relevancia para la adsorción de metales y compuestos tóxicos. Este enfoque abre la posibilidad de reutilizar residuos como insumos estratégicos, aunque persiste la necesidad de evaluar su desempeño en condiciones extremas y a largo plazo.

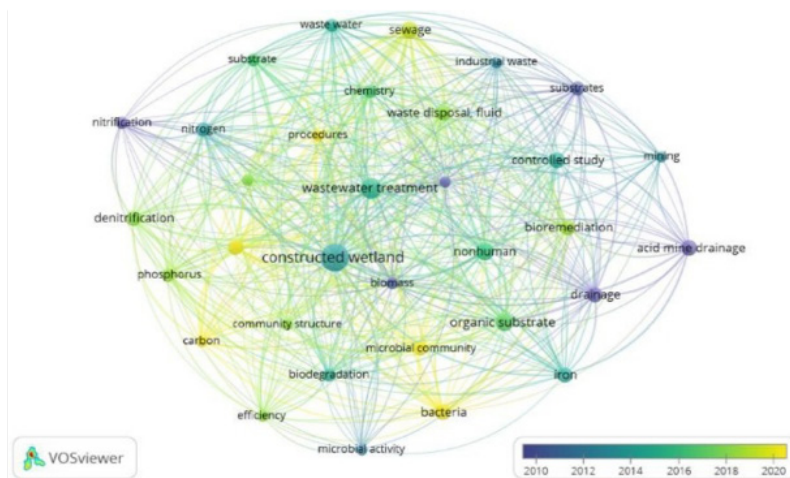
## **Figura 2.**

*Mapa de coocurrencia de las palabras clave*



La figura 3 muestra la evolución temporal de los términos clave en la literatura científica sobre humedales artificiales y sustratos alternativos desde 2010 hasta la actualidad. Los términos más antiguos, representados en tonos azul oscuro, como “acid mine drainage”, “controlled study”, “nitrification”, entre otros, indican que a principios de la década pasada las investigaciones se centraban en la remediación de residuos industriales, procesos básicos de tratamiento y aplicaciones en contextos mineros. A partir de 2016 y con mayor intensidad hacia 2018-2020, se observa una transición hacia términos representados en colores verde a amarillo, como “constructed wetland”, “organic substrate”, “bacteria”, “microbial activity” y “efficiency”, lo cual indica una tendencia hacia el estudio de los sustratos que son los principales agentes en estos procesos de interacción biológica.

**Figura 3.**  
*Mapa de visualización temporal*

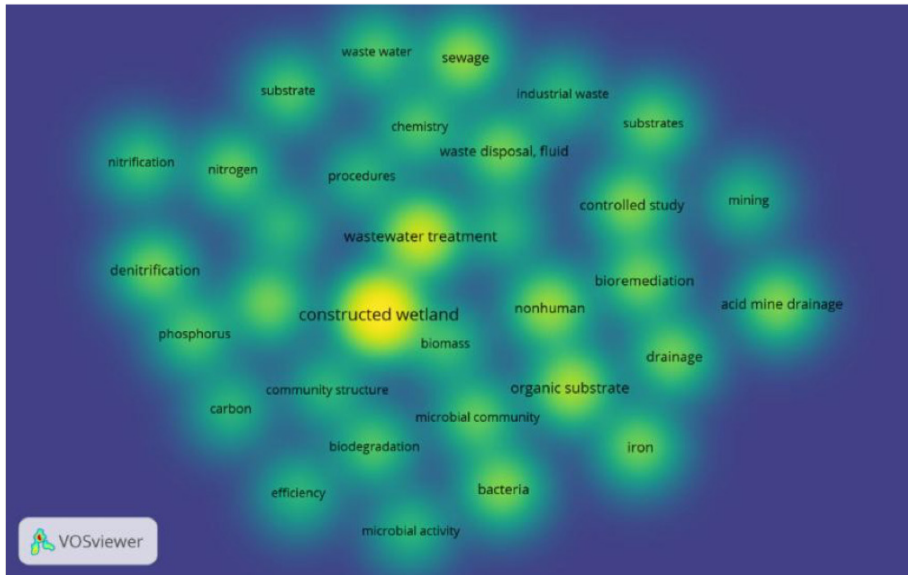


En la figura 4, el mapa revela zonas de interés creciente con densidad media-alta en términos como “bacteria”, “biodegradación”, “efficiency” y “phosphorus”, vinculados con la actividad microbiana y la eliminación de nutrientes. Por otro lado, aunque términos como “acid mine drainage” o “industrial waste” aparecen con menor densidad, su presencia sugiere nichos temáticos relevantes en contextos específicos de contaminación.

En conjunto, esta visualización que muestra las palabras clave “bacteria”, “biodegradación”, “efficiency”, “phosphorus” y “wastewater treatment” respaldan la pertinencia del presente trabajo, pues evidencian que el uso de sustratos orgánicos en humedales construidos representa un nodo activo de investigación.

**Figura 4.**

*Mapa de densidad y temas de interés*



En la figura 5 se muestran los países con mayor productividad científica en este rubro, destacando China, India, México, Estados Unidos, Australia, entre otros. Según Sharma et al. (2023) y Panghal et al. (2024) las razones que promueven estos estudios se centran en cuatro aspectos:

1. Disponibilidad de residuos agrícolas y biomasa.
2. Necesidad de soluciones económicas y sostenibles.
3. Políticas ambientales y financiamiento.
4. Colaboración internacional y redes de investigación.

**Figura 5.**

*Países con mayor productividad científica*

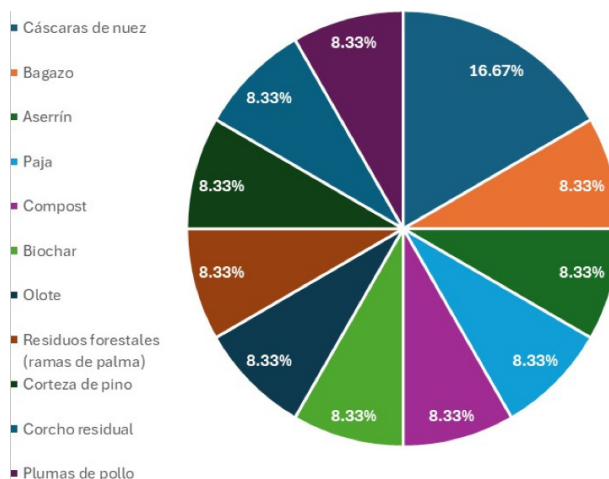


En la figura 6 podemos observar los principales sustratos orgánicos empleados en humedales artificiales. Entre los beneficios de su implementación destaca:

- Aporte de carbono: estimula la actividad de bacterias reductoras de sulfato y otros microorganismos clave para la remoción de metales y nutrientes (Chen et al., 2021; Gross et al., 2020).
- Mejora de la remoción de contaminantes: incrementa la eficiencia en la eliminación de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y metales pesados (Sharma et al., 2024; Chen et al. 2021).
- Soporte para plantas y microorganismos: favorece el crecimiento vegetal y la formación de biopelículas funcionales (Sharma et al., 2024; Chen et al. 2021).

**Figura 6.**

*Principales sustratos orgánicos empleados en humedales artificiales*



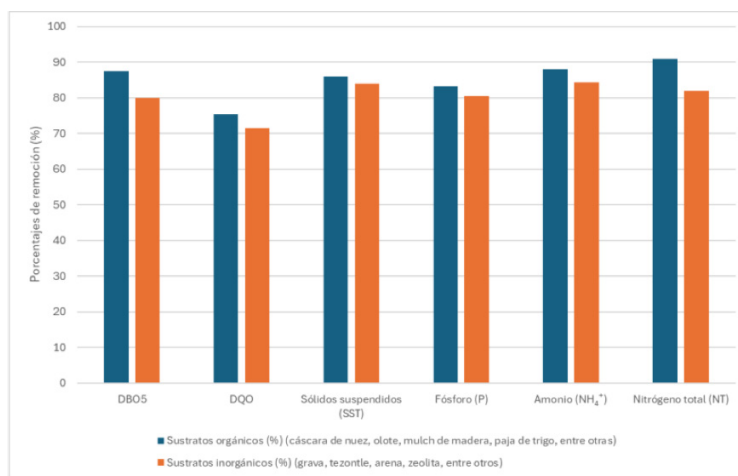
La figura 7 muestra que los sustratos orgánicos suelen ser más efectivos que los inorgánicos en humedales artificiales. Según Wang et al. (2022) y Ji et al. (2021), éstos aportan una fuente de carbono fácilmente disponible, lo que estimula la actividad microbiana y favorece procesos biológicos clave como la desnitrificación y la reducción de metales pesados. De acuerdo con Long et al. (2024), estos materiales, como cáscara de nuez, biochar o fibras vegetales, no sólo mejoran la retención y transformación de contaminantes, sino que también promueven el crecimiento de comunidades microbianas funcionales y plantas, aumentando la eficiencia global del sistema.

Los sustratos orgánicos pueden facilitar la formación de biopelículas y la adsorción de metales y nutrientes, mientras que los inorgánicos dependen más de procesos físicos y químicos como la filtración y la adsorción, que pueden saturarse rápidamente (Korboulewsky et al., 2012; Cun et al., 2024). Lopololo et al. (2025) y Singh y Chakraborty (2020) mencionan que la presencia de materia orgánica también favorece la diversidad y abundancia de bacterias especializadas en la degradación de contaminantes, lo que resulta en una mayor capacidad de remoción sostenida a largo plazo. Sin embargo, es importante considerar que los sustratos orgánicos pueden degradarse con el tiempo y requerir reposición, mientras que los inorgánicos suelen ser más estables, pero menos activos biológicamente. Los sustratos orgánicos alcanzaron eficiencias

de remoción sobresalientes, con valores promedio de 80-85% en DBO, 70-80% en DQO, 85-87% en sólidos suspendidos, 80-85% en fósforo, 85-88% en amonio y hasta 90-91% en nitrógeno total. Estos resultados confirman su capacidad para igualar o superar a los materiales inorgánicos tradicionales, como grava, arena o tezontle, evidenciando, además, su versatilidad para la eliminación integral de contaminantes. Así, demuestra que el aprovechamiento de residuos agroindustriales y forestales como sustratos permite transformar materiales subutilizados y contaminantes en recursos valiosos para la producción de bioproductos, enzimas, biocombustibles, bioplásticos y materiales de construcción. Ello reduce la presión sobre recursos vírgenes y minimiza la acumulación de residuos sólidos, alineándose con los principios de la economía circular (Yaashikaa et al., 2021; Bibi et al., 2023).

**Figura 7**

*Porcentaje de remoción en sustratos orgánicos e inorgánicos*



Por otro lado, la literatura revisada menciona que el uso de residuos textiles como sustratos en humedales artificiales es una propuesta innovadora, pero aún poco explorada en la literatura científica. Si bien estos sistemas han incorporado materiales alternativos como fibras naturales (por ejemplo, coco) y residuos lignocelulósicos para mejorar la retención de nutrientes y la actividad microbiana, la aplicación específica de textiles sintéticos o mezclados no ha sido ampliamente documentada (Wang et al., 2019; Ji et al., 2021). Por su alta superficie específica y estructura porosa, dichos materiales podrían favorecer la adsorción de contaminantes y el desarrollo de biopelículas, además de ofrecer una vía para valorizar desechos y reducir el impacto ambiental de

la industria textil (Yang et al., 2018). Sin embargo, Chen et al. (2021) señalan la existencia de desafíos potenciales, como la liberación de microplásticos o compuestos tóxicos, la estabilidad a largo plazo y la posible colmatación del sistema. De acuerdo con la literatura revisada, se destaca la necesidad de investigar a fondo la viabilidad, eficiencia y riesgos ambientales asociados al uso de residuos textiles como sustrato en humedales artificiales, especialmente en comparación con otros materiales reciclados y naturales que han sido estudiados más a fondo, como los residuos orgánicos y el material inorgánico (tezontle, grava, zeolita, entre otros).

## **Conclusiones**

Se analizaron 49 estudios científicos publicados entre 2010 y 2025, en los cuales se identificaron materiales como bagazo, cáscaras de nuez, aserrín, paja, compost, biochar y olote. Éstos mostraron eficiencias de remoción comparables o incluso superiores a las de los materiales inorgánicos tradicionales.

Los sustratos orgánicos lograron eficiencias de remoción promedio de 80-85% en DBO, 70-80% en DQO, 82-95% en nitrógeno y 80-85% en fósforo, superando en algunos casos a materiales como grava, arena o tezontle.

Desde la perspectiva de la economía circular, el uso de residuos agroindustriales y forestales como sustratos representa una solución doble: mejora la eficiencia del tratamiento y reduce la disposición inadecuada de residuos sólidos. También disminuye los costos de implementación y mantenimiento de los humedales artificiales, facilitando su adopción en áreas rurales o con recursos limitados.

El uso de fibras textiles recicladas aún está en sus primeras etapas y se considera una línea de investigación emergente que necesita más estudios para evaluar su viabilidad técnica, su impacto ambiental a largo plazo, como la posible liberación de microplásticos y su efectividad en este contexto.

En conjunto, los resultados respaldan que los sustratos orgánicos no sólo son una alternativa viable para la remoción eficiente de contaminantes, sino que también constituyen una estrategia clave para avanzar hacia sistemas de tratamiento de agua más sostenibles, resilientes y alineados con los principios de la economía circular y el aprovechamiento integral de recursos.

## Referencias

- Agaton, C. B. (2024). Análisis de opciones reales de humedales construidos como soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales bajo múltiples incertidumbres: un estudio de caso en Filipinas [Real Options Analysis of Constructed Wetlands as Nature-Based Solutions to Wastewater Treatment Under Multiple Uncertainties: A Case Study in the Philippines]. *Sustainability*, 16(22), 9797. <https://doi.org/10.3390/su16229797>
- Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N. y Almela, L. (2016). Depuración de aguas residuales domésticas usando un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal y optimización teórica de superficie: un estudio de caso bajo clima mediterráneo seco [Domestic Wastewater Depuration Using a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland and Theoretical Surface Optimization: A Case Study under Dry Mediterranean Climate]. *Water*, 8(10), 434. <https://doi.org/10.3390/w8100434>
- Chen, J., Deng, S., Jia, W., Li, X. y Chang, J. (2021). Remoción de múltiples metales pesados de agua impactada por minería con humedales construidos llenos de biochar: rutas de adsorción y remoción biótica [Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes]. *Bioresource Technology*, 331, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125061>
- Chen, Y., Li, T., Hu, H., Ao, H., Xiong, X., Shi, H. y Wu, C. (2021). Transporte y destino de microplásticos en humedales construidos: un estudio de microcosmos [Transport and fate of microplastics in constructed wetlands: A microcosm study]. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125615>
- Chen, J., Li, X., Jia, W., Shen, S., Deng, S., Ji, B. y Chang, J. (2020). Promoción del desempeño de biorremediación en microcosmos de humedal construido para tratamiento de drenaje ácido de mina usando sustratos orgánicos y

suplementando aguas residuales domésticas y caldo de litter de planta [Promotion of bioremediation performance in constructed wetland microcosms for acid mine drainage treatment by using organic substrates and supplementing domestic wastewater and plant litter broth]. *Journal of Hazardous Materials*, 404 Pt A, 124125. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124125>

Cui, L., Zhu, X., M., Ouyang, Y., Dong, M., Zhu, W. y Luo, S. (2008). Capacidades de sorción de fósforo y propiedades fisicoquímicas de nueve materiales de sustrato para humedal construido [Phosphorus Sorption Capacities and Physicochemical Properties of Nine Substrate Materials for Constructed Wetland]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 55, 210–217. <https://doi.org/10.1007/s00244-007-9109-y>

Cun, D., Wang, H., Jiang, M., Lin, R., Deng, S., Chang, J., Zhao, Y. y Duan, C. (2024). Remediación efectiva de drenaje agrícola en tres intensidades de influente con humedales construidos bioaumentados llenos con mezcla de carbono de hierro y sustratos orgánicos sólidos: desempeño y mecanismos [Effective remediation of agricultural drainage at three influent strengths by bioaugmented constructed wetlands filled with mixture of iron carbon and organic solid substrates: Performance and mechanisms]. *The Science of the Total Environment*, 947, 174615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174615>

De Souza, T. O., De Assis, L. D. S., Da Silva Marques, D., De Freitas Coelho, A. L., Cecon, P. R. y Borges, A. C. (2024). Humedales construidos de flujo tidal de alta carga acoplados con celdas de combustible microbianas: efectos de la vegetación y tamaño del material de llenado [High-loaded tidal flow constructed wetlands coupled with microbial fuel cells: effects of the vegetation and filling material size]. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35622-7>

Escobar, L. a. G. (2025). Descripción de un nuevo humedal cauce aislado de río en Colombia [Description of a new isolated river channel wetland in Colombia]. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 5. <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2024.05.08>

Fontalvo-Buelvas, J. C. (Coord.). (2023). Huertos en instituciones de educación superior: Relatos y experiencias desde México [Orchards in higher education institutions: Stories and experiences from Mexico]. *Comunicación Científica*. <https://doi.org/10.52501/cc.191>

- Gross, M., Formica, S., Gandy, L. y Hestir, J. (2020). Una comparación de materiales locales de residuos para sustrato de humedales reductores de sulfato [A Comparison of Local Waste Materials for Sulfate-Reducing Wetlands Substrate]. pp. 179–185. <https://doi.org/10.1201/9781003069997-21>
- Herrera-Melián, J. A., Torres-Padrón, M. E., Betancor-Abreu, A., Sosa-Ferrera, Z., Santana-Rodríguez, J. J., Martín-González, M. A., Araña, J. y Guedes-Alonso, R. (2014). Reducción de bloqueo y remoción de residuos hormonales con filtro orgánico de flujo vertical a escala de laboratorio y humedal híbrido [Clogging reduction and removal of hormone residues with laboratory-scale vertical flow organic-based filter and hybrid wetland]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(3), 1039–1052. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0495-6>
- Hu, S., He, R., Zeng, J., Zhao, D., Wang, S., He, F., Yu, Z. y Wu, Q. L. (2022). Menor variación composicional y mayor complejidad de la comunidad bacteriana de la rizosfera en humedal construido comparado con humedal natural [Lower Compositional Variation and Higher Network Complexity of Rhizosphere Bacterial Community in Constructed Wetland Compared to Natural Wetland]. *Microbial Ecology*, 85(3), 965–979. <https://doi.org/10.1007/s00248-022-02040-6>
- Irshad, S., Xie, Z., Qing, M., Ali, H., Ali, I., Ahmad, N., Khan, M. y Nawaz, A. (2024). Aplicación de filtro de carbono activado de concha de coco en humedal construido de flujo subsuperficial vertical para biorremediación multi-metal potenciada y respuesta antioxidante de *Salvinia cucullata* [Application of coconut shell activated carbon filter in vertical subsurface flow constructed wetland for enhanced multi-metal bioremediation and antioxidant response of *Salvinia cucullata*]. *Environmental Pollution*, 123597. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123597>
- Ji, Z., Tang, W. y Pei, Y. (2021). Sustratos de humedal construido: una revisión sobre desarrollo, mecanismos de función y aplicación en remoción de contaminantes [Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal]. *Chemosphere*, 286 Pt 1, 131564. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131564>
- Junca-Gómez, D. A., Hernández-Alarcón, M. E. y Marín-Muñoz, J. L. (2024). Charlas educativas no formales en parques de Xalapa, Veracruz: Una visión hacia

el conocimiento y conservación de humedales naturales urbanos [Non-formal educational talks in parks of Xalapa, Veracruz: A view towards knowledge and conservation of urban natural wetlands]. *Revista Eduscientia. Divulgación de la Ciencia Educativa*, 1(especial), 61–72. <http://www.eduscientia.com/index.php/journal/article/view/425>

Khalifa, M., El-Reash, Y., Ahmed, M. y Rizk, F. (2020). Efecto de la variación de medio en la eficiencia de remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas en sistemas de humedal construido [Effect of media variation on the removal efficiency of pollutants from domestic wastewater in constructed wetland systems]. *Ecological Engineering*, 143, 105668.

Kivaisi, A. R. y Zhao, Q. (2024). Mejora de mini-batch multiple augmentation para reconocimiento de palabras habladas con recursos limitados [Improved mini-batch multiple augmentation for low-resource spoken word recognition]. *Expert Systems with Applications*, 252, 124157. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124157>

Kong, F., Wang, J., Hou, W., Cui, Y., Yu, L., Zhang, Y. y Wang, S. (2022). Influencia de biochar modificado apoyado en sulfidación de nano-iron cero valente (S-nZVI/BC) en remoción de nitrato y emisión de gases de efecto invernadero en humedal construido [Influence of modified biochar supported sulfidation of nano-zero-valent-iron (S-nZVI/BC) on nitrate removal and greenhouse gas emission in constructed wetland]. *Journal of Environmental Sciences*, 125, 568–581. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.040>

Korboulewsky, N., Wang, R. y Baldy, V. (2012). Procesos de purificación involucrados en tratamiento de lodos por sistema de humedal de flujo vertical: Enfoque en el rol del sustrato y plantas en remoción de N y P [Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal]. *Biore-source Technology*, 105, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.037>

Latip, S. N. H. M., Damanhuri, S. N. A., Ibrahim, N. D., Chin, K. B. y Nasruddin, M. F. (2022). Utilización de humedales construidos de agua hyacinth para tratamiento de aguas residuales en piscinas de oxidación [Utilising Constructed Wetlands From Water Hyacinth for Wastewater Treatment in Oxidation Ponds]. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(5). <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.05.016>

- Lin, Z., Li, M., Yan, P., Zhang, J., Xie, H. y Wu, H. (2025). Humedales construidos para tratamiento y reuso de aguas residuales: Dos décadas de experiencia de China [Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Reuse: Two Decades of Experience from China]. *Environmental Research*, 121781. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121781>
- Long, Y., Yu, G., Wang, J. y Zheng, D. (2024). Remoción de cadmio por humedales construidos con diferentes sustratos: desempeño, microorganismos y mecanismos [Cadmium removal by constructed wetlands containing different substrates: performance, microorganisms and mechanisms]. *Bioresource Technology*, 131561. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131561>
- López-Rosas, H., Moreno-Casasola, P. y Peralta-Peláez, L. A. (2024). Herramientas para lograr cambios positivos en la actitud hacia el agua y los humedales [Tools to achieve positive changes in attitude towards water and wetlands]. *Revista Eduscientia. Divulgación de la Ciencia Educativa*, 1(especial), 127–137. <http://www.eduscientia.com/index.php/journal/article/view/429>
- Lopopolo, L., Herrera-Melián, J. A., Arocha-Espiau, D., Naghoum, I., Ranieri, E., Guedes-Alonso, R. y Sosa-Ferrera, Z. (2025). Mejora de un humedal construido de flujo superficial horizontal con residuos forestales y aireación [Upgrading a horizontal surface flow constructed wetland with forest waste and aeration]. *Journal of Environmental Management*, 376, 124468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124468>
- Nata, I., Irawan, C., Putra, M., Hudha, M., Syarkani, M. y Naufal, A. (2024). Adsorción simultánea de iones Cr(III) y contaminantes en biocompuesto magnético de amina basado en fibra de bagazo de caña de azúcar/cascarilla de arroz [Simultaneous adsorption of Cr(III) ions and contaminants on Sugarcane bagasse/rice husk fiber-based amine magnetic biocomposite]. *Journal of Hazardous Materials Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100412>
- Nuamah, L., Li, Y., Pu, Y., Nwankwegu, A., Zhang, H., Norgbey, E., Banahene, P. y Bofah-Buoh, R. (2020). Humedales construidos: estado, progreso y desafíos. La necesidad de reevaluación operativa crítica para un ecosistema productivo más limpio [Constructed wetlands, status, progress, and challenges. The need for critical operational reassessment for a cleaner productive ecosystem]. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122340>

- Panghal, V., Singh, A., Hooda, V., Arora, D., Bhateria, R. y Kumar, S. (2024). Progreso reciente, desafíos y perspectivas futuras en humedales construidos que emplean biochar como sustrato: una revisión comprehensiva [Recent progress, challenges, and future prospects in constructed wetlands employing biochar as a substrate: a comprehensive review]. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35846-7>
- Paredes, D. (2007). En Memorias de la conferencia internacional de Humedales [In Proceedings of the International Wetlands Conference]. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, Pereira, Risaralda, Colombia.
- Patyal, V., Jaspal, D. y Khare, K. (2024). Evaluación de matriz compuesta en humedal construido para remoción de fósforo [Evaluation of composite matrix in constructed wetland for phosphorus removal]. *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101870>
- Pinho, H. J. y Mateus, D. M. (2021b). Valorización de residuos sólidos en humedales construidos de flujo subsuperficial basados en estructuras modulares renovables: una contribución a la economía circular [Valorization of solid waste in subsurface flow constructed wetlands based on renewable modular structures: A contribution to a circular economy]. En *Circular economy and sustainability* (pp. 215–233). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821664-4.00019-4>
- Reed, C., Crites, R. W. y Middlebrooks, E. J. (1995). *Sistemas naturales para tratamiento y gestión de residuos* [Natural systems for waste management and treatment]. McGraw Hill Co.
- Saeed, T. y Sun, G. (2013). Un estudio a escala de laboratorio de humedales construidos con bagazo de caña de azúcar y medios de arena para tratamiento de aguas residuales textiles [A lab-scale study of constructed wetlands with sugarcane bagasse and sand media for the treatment of textile wastewater]. *Bioresource Technology*, 128, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.052>
- Saeed, T., Miah, M. y Yadav, A. (2022). Desarrollo de humedales construidos híbridos integrados con electrodos usando materiales orgánicos, de cons-

- trucción y rechazados como medios de filtro: tratamiento de lixiviado de vertedero [Development of electrodes integrated hybrid constructed wetlands using organic, construction, and rejected materials as filter media: Landfill leachate treatment]. *Chemosphere*, 135273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135273>
- Santos, J., Rodrigues, S., Magalhães, M., Rodrigues, K., Pereira, L. y Marinho, G. (2024). Una revisión de vanguardia (2019–2023) sobre humedales construidos para tratamiento y reuso de agua gris [A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse]. *Environmental Challenges*, 16, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100973>
- Sharma, M., Sharma, N. y Kanwar, R. (2023). Evaluación de sustratos derivados de agri-residuos para cultivar plantas ornamentales para humedal construido [Assessment of agriwaste derived substrates to grow ornamental plants for constructed wetland]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 84645–84662. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28364-5>
- Sharma, M., Sharma, N. y Kanwar, R. (2024). Análisis de desempeño de meso-cosmo-humedal construido con sustratos derivados de residuos agrícolas para tratamiento de aguas residuales [Performance analysis of meso-cosm-constructed wetland containing agricultural waste-derived substrates for treatment of wastewater]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(12), 1220. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13411-6>
- Singh, S. y Chakraborty, S. (2020). Perfeccionamiento de humedal construido con sustrato orgánico tratando drenaje ácido de mina (AMD) del Nordeste de India [Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India]. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122719. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122719>
- Sun, Q., Wang, X. y Wang, L. (2019). Impacto ecológico del control de contaminación de aguas de watershed en escenarios turísticos costeros [Ecological impact of watershed water pollution control on coastal tourist scenic spots]. *The International Journal of Low Carbon Technologies*, 15(1), 84–88. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz060>
- Vymazal, J. (2014). Humedales construidos para tratamiento de aguas residuales industriales: una revisión [Constructed wetlands for treatment of indus-

trial wastewaters: a review]. *Ecological Engineering*, 73, 724–751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>

Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F. y Fu, J. (2019). Evaluación comprehensiva de materiales de sustrato para remoción de contaminantes en humedales construidos [Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands]. *The Science of the Total Environment*, 701, 134736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736>

Wang, T., Liu, R., O'Meara, K., Mullan, E. y Zhao, Y. (2018). Evaluación de un humedal construido de flujo tidal en campo para tratamiento de aguas residuales de ganado porcino: enfoque de ciclo de vida [Assessment of a Field Tidal Flow Constructed Wetland in Treatment of Swine Wastewater: Life Cycle Approach]. *Water*, 10(5), 573. <https://doi.org/10.3390/w10050573>

Wang, Y., Zhou, P., Song, X. y Xu, Z. (2022). Nitrificación y desnitrificación simultánea en humedal construido apoyado en PCL con aireación limitada [Simultaneous nitrification and denitrification in a pcl-supported constructed wetland with limited aeration]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 22606–22616. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23748-5>

Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A. y Gałka, B. (2022). Remoción de contaminantes seleccionados de lixiviado de vertedero en humedales construidos con diferentes llenados [Removal of selected pollutants from landfill leachate in constructed wetlands with different filling]. *Bioresource Technology*, 353, 127136. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127136>

Yakar, A., Türe, C., Türker, O. C., Vymazal, J. y Saz, Ç. (2018). Impactos de diversos medios de filtración en tratamiento de aguas residuales y producción de bioelectricidad en humedal construido de flujo ascendente combinado con celda de combustible microbiana (UCW-MFC) [Impacts of various filtration media on wastewater treatment and bioelectric production in up-flow constructed wetland combined with microbial fuel cell (UCW-MFC)]. *Ecological Engineering*, 117, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.016>

Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R. y Morgan, D. (2018). Desarrollo global de diversos sustratos emergentes utilizados en humedales construidos [Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands]. *Bioresource Technology*, 261, 441–452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.085>

- Yang, C., Zhang, X., Tang, Y., Jiang, Y., Xie, S., Zhang, Y. y Qin, Y. (2022). Selección y optimización del sustrato en humedal construido: una revisión [Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review]. Journal of Water Process Engineering, 49, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103140>
- Yaashikaa, P., Kumar, S. y Varjani, S. (2021). Valorización de residuos agroindustriales para proceso de biorrefinería y bioeconomía circular: una revisión crítica [Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review]. Bioresource Technology, 126126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126>

Derechos de Autor© 2026 Domínguez-Solís, Diego; Martínez-Rodríguez, María Concepción; Ramírez-Escamilla, Héctor Guadalupe.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.