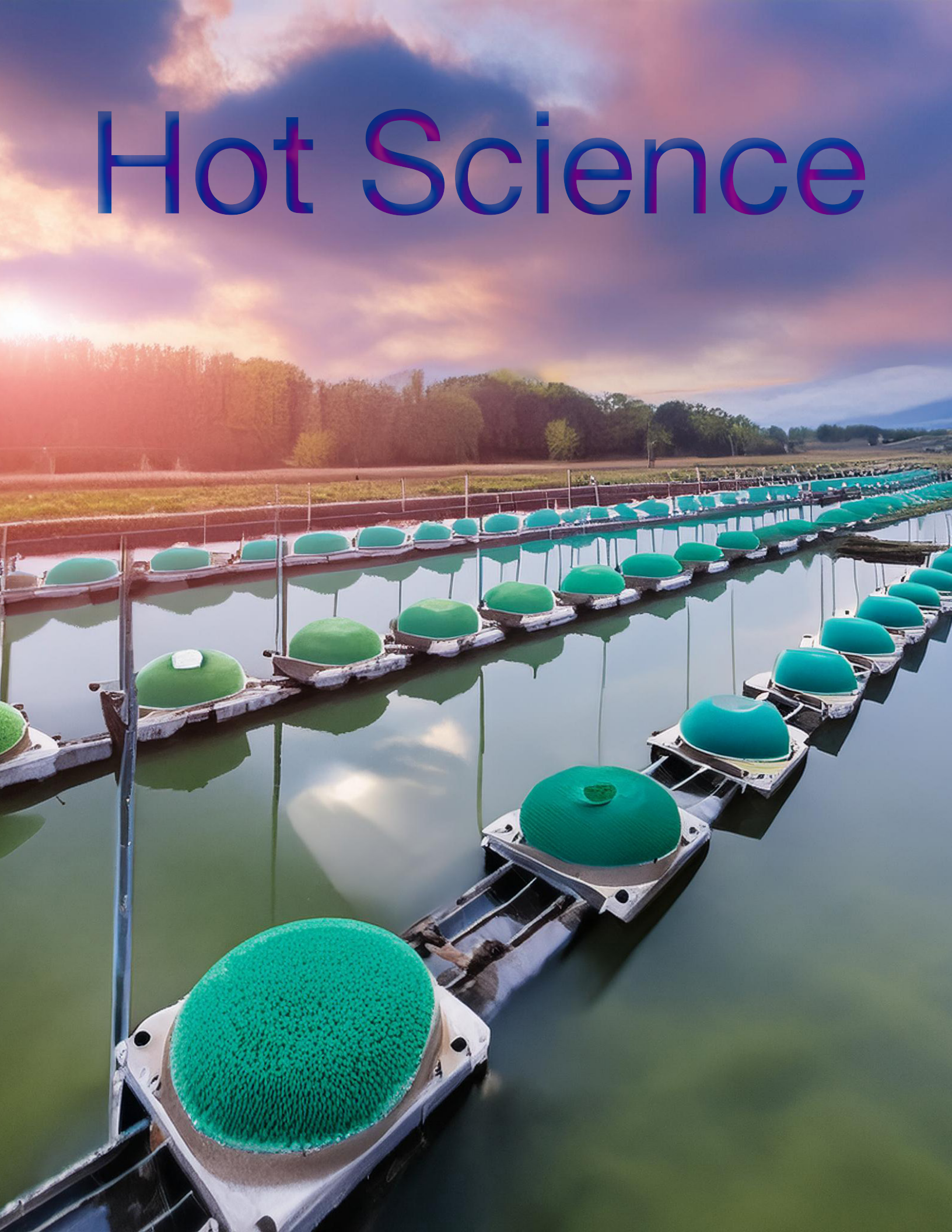


Hot Science



Maravillas ocultas: El poder transformador de los microorganismos en los humedales construidos

Wonders unveiled: The transformative power of microorganisms in constructed wetlands

Resumen

Los Humedales Construidos (HC) son tecnologías avanzadas para tratar agua residual, se basan en procesos naturales. Funcionan gracias a la colaboración sinérgica de diversos elementos como: plantas, medio filtrante, y microorganismos, estos últimos, siendo cruciales para degradar los contaminantes del agua. Aunque son fundamentales, todavía hay poca comprensión sobre aspectos como su diversidad, reproducción y el papel de desempeñan en los HC. Este artículo busca llenar ese vacío, ofreciendo una visión detallada que enriquezca la comprensión de estos aspectos y ayude en el diseño y gestión del tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: Microorganismos, degradación de contaminantes, humedales construidos.

Summary

Constructed wetlands are advanced technologies for treating wastewater, relying on natural processes. They operate through the synergistic collaboration of various elements such as plants, filter media, the contaminants present in wastewater, and microorganisms, the latter being crucial for degrading water pollutants. Although vital, the diversity, proliferation, and effectiveness of microorganisms in these systems are still poorly understood. This article seeks to fill that gap by offering a detailed insight that enriches the understanding of their role in constructed wetlands and assists in the design and management of wastewater treatment.

Keywords: Microorganisms, pollutant degradation, constructed wetlands.

Georgina Martínez-Reséndiz*

Denisse Astrid Hernández-Castelán

Luis Carlos Sandoval Herazo

Laboratorio De Humedales y Sustentabilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México.

*Autor para la correspondencia:
georgina.martinez.tecm@gmail.com

Los países en desarrollo buscan alternativas económicamente viables para el tratamiento de aguas residuales y que garanticen altos niveles de eficiencia. Entre las tecnologías disponibles, los Humedales Construidos (HC) destacan como una opción prometedora. Estos sistemas imitan los procesos naturales de los humedales, utilizando plantas y microorganismos para purificar el agua. Además de ser efectivos en la eliminación de contaminantes, son de fácil instalación, poco mantenimiento a largo plazo, bajo consumo energético y bajo impacto ambiental, por tal, representan una solución sustentable para el tratamiento de aguas residuales, principalmente en comunidades en desarrollo. Los HC han despertado el interés en todo el mundo. Sin embargo, aún existe incertidumbre sobre lo que sucede en el interior de estos ecosistemas, las reacciones internas y los responsables de eliminar los contaminantes. Destacados autores han descubierto que los microorganismos son los principales agentes, por lo que estudiar sus funciones y la forma en que transforman los contaminantes, resulta de suma importancia.

¿Cuál es el papel de los microorganismos en un HC?

Los microorganismos desempeñan un papel esencial ya que son los responsables principales de procesos de degradación y transformación de los contaminantes presentes en el agua residual. Estos organismos (bacterias, hongos, algas, etc.), realizan diversas funciones biológicas que son críticas para la eficacia del tratamiento.

Descomposición de materia orgánica:

La materia orgánica proveniente de fuentes biológicas como plantas y animales, o de fuentes sintéticas como derivados del petróleo, se considera contaminante cuando se encuentra en altas concentraciones por sus efectos adversos en la salud y el medio ambiente. Los microorganismos descomponen la materia orgánica del agua residual, convirtiéndola en compuestos simples y menos perjudiciales, lo que es fundamental para la eliminación de contaminantes orgánicos nitrogenados originados por estiércoles y compostas o sintéticos como la urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio (derivados de pesticidas, herbicidas y otros productos químicos).

Ciclo del nitrógeno: Es un proceso natural donde el nitrógeno del agua residual es transformado y reciclado por los microorganismos mediante diferentes etapas, contribuyendo a la purificación del agua y a mantener equilibrio en el ecosistema, ya que convierten parte del nitrógeno en nutrientes para plantas, y transforman otros tipos de nitrógeno en gas que regresa a la atmósfera. Algunas formas de nitrógeno presentes en el agua residual son amonio, nitratos, nitritos y nitrógeno gaseoso.

Eliminación de contaminantes específicos: Los microorganismos ayudan a descomponer compuestos orgánicos persistentes, pueden acumular metales pesados en sus tejidos, precipitarlos o facilitar su adsorción mediante procesos biológicos; compiten con patógenos como virus y bacterias para disminuir su presencia y tienen la capacidad de metabolizar una amplia variedad de compuestos químicos,

convirtiéndolos en formas menos tóxicas o inactivas.

Fijación de carbono: Este proceso es la conversión de dióxido de carbono en compuestos orgánicos. Al realizar procesos metabólicos, los microorganismos pueden absorber y fijar carbono orgánico, ayudando en la purificación del agua y la captura de carbono atmosférico.

¿Cuáles son los microorganismos que están presentes en los HC?

Bacterias: Son los más abundantes y diversos en los HC. Los principales filos involucrados incluyen *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* y *Firmicutes*. Desempeñan funciones sumamente importantes como catalizar reacciones químicas (acelerar y facilitar las reacciones químicas), participar en la degradación de materia orgánica, biosorción, mineralizar nutrientes como nitrógeno y fósforo, promover el crecimiento de plantas, etc [1].

Hongos: Participan en la descomposición de materia orgánica y en la formación de redes de hifas que ayudan a estabilizar el sustrato del HC, es decir el medio en el que se desarrollan las plantas. Algunos hongos micorrízicos también pueden formar simbiosis con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes. Se ha demostrado que la actividad fúngica eleva la tasa de eliminación de contaminantes como materia orgánica, nitrógeno y fósforo.

Algas: Las algas fotosintéticas pueden encontrarse en la superficie del agua contribuyendo a la producción de oxígeno y a la captura de nutrientes, como fósforo, mediante la absorción. El género *Chlorella* ha sido empleada en el tratamiento de aguas residuales con antibióticos, obteniendo excelentes resultados [3].

Protozoos: Su actividad contribuye a la mineralización de nutrientes y a la circulación de energía en el ecosistema. Estudios han revelado que los protozoos más dominantes en el tratamiento de aguas residuales, pertenecen al grupo *Ciliophora*.

Arqueas: Las arqueas también pueden desempeñar roles importantes en la descomposición de materia orgánica y en ciclos biogeoquímicos, como son las arqueas oxidantes de amoníaco implicadas en la eliminación de nitrógeno.

Adaptación y sensibilidad ambiental de los microorganismos en HC

La comunidad bacteriana en HC incluye microorganismos autóctonos (nativos) y alóctonos (foráneos). Los autóctonos muestran adaptaciones específicas y una actividad metabólica significativa en este entorno. Además, colaboran con plantas, sustratos y otras comunidades microbianas para gestionar contaminantes eficazmente. Sin embargo, su capacidad de movimiento y procesos en los que ciertos contaminantes se agrupan o se adhieren a ellos, son influenciados por factores ambientales, como

condiciones aeróbicas y anaeróbicas, solubilidad de ciertos contaminantes, niveles de fósforo, nitrógeno, pH y temperatura.

Los microorganismos alóctonos pueden ser seleccionados y añadidos a los humedales construidos para mejorar la degradación de contaminantes orgánicos. Estos organismos son capaces de descomponer compuestos complejos que las comunidades microbianas nativas en algunas ocasiones no pueden procesar de manera efectiva.

No todos los microorganismos en HC son benéficos

Las aguas residuales albergan diversos microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades como diarrea, fiebre tifoidea, disentería, cólera, hepatitis, entre otras [4]. Las ventajas de los HC sobre otras tecnologías, en

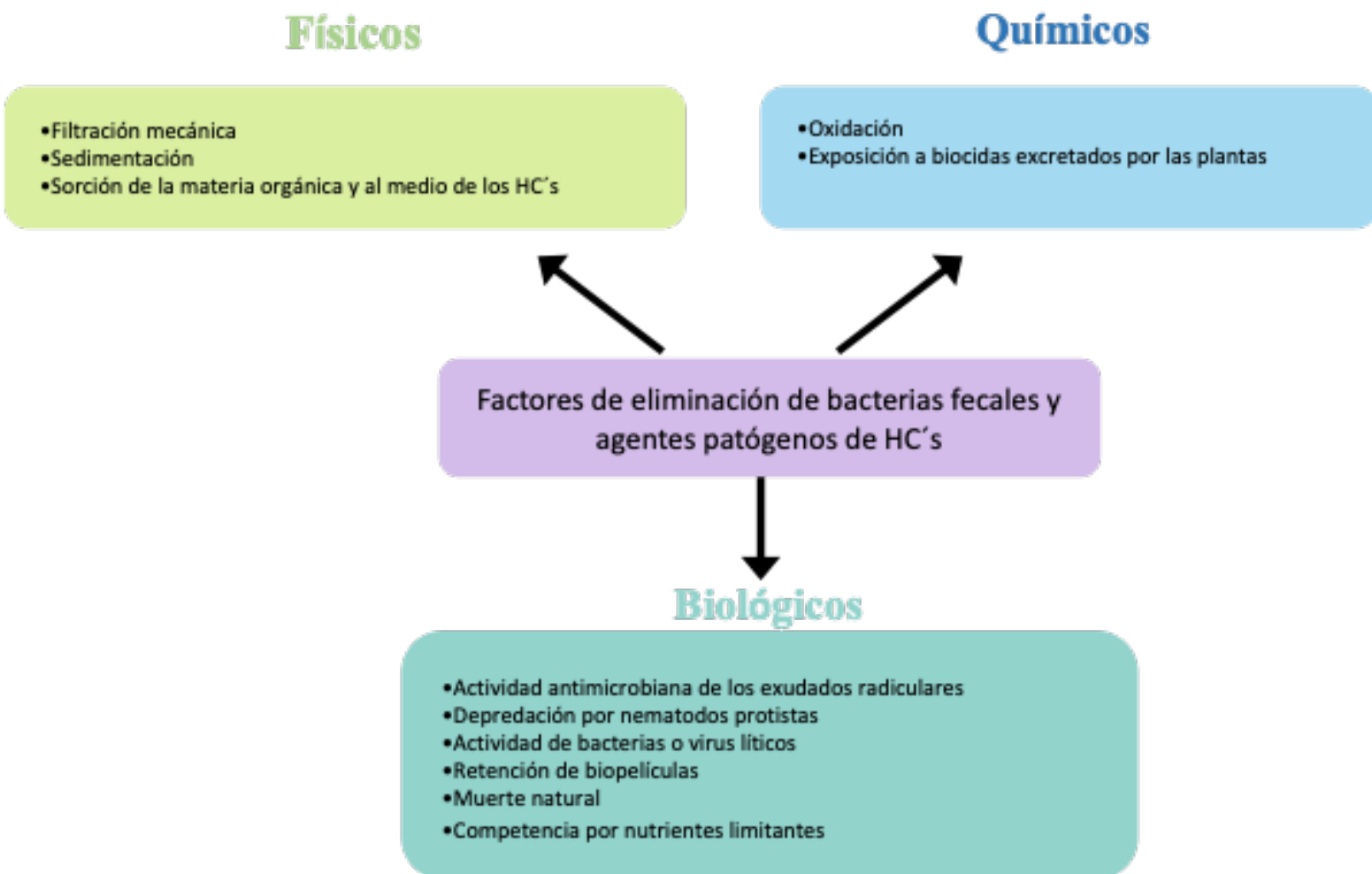


Figura 1. Factores de eliminación de bacterias fecales y patógenos en HC.

Tabla 1. Relación entre mecanismos de remoción y parámetros de diseño en los HC.

Mecanismo de remoción	Parámetros de diseño
Sedimentación	Tipo de medio filtrante, configuración
Muerte natural	Tiempo de retención hidráulica
Temperatura	Ubicación, presencia de plantas, actividad microbiana
Oxidación	Presencia en la planta, configuración
Depredación	Ecología y actividad microbiana
Adhesión a la biopelícula	Ecología y actividad microbiana
Filtración mecánica	Tipo de medio filtrante, configuración
Exposición a biocidas	Tipo de planta
Radiación UV	Configuración

países en desarrollo, incluyen su eficacia demostrada para eliminar e inactivar patógenos en aguas residuales, con un porcentaje de eficacia superior al 99%. No obstante, esto puede variar según varios factores.

Algunos patógenos que pueden ser eliminados o reducidos en HC incluyen bacterias (como *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., y otros coliformes fecales), virus (como norovirus y rotavirus), protozoos, (como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* spp.) y helmintos (como *Áscaris lumbricoides*). Esta eliminación sucede mediante factores físicos, químicos y biológicos, solos o combinados (Figura 1).

La eliminación más significativa de patógenos varía según el diseño de los HC, tiempo de retención hidráulica, características del agua residual, pH, clima, medio filtrante y vegetación. Ampliar la comprensión sobre la correlación de los mecanismos de eliminación de patógenos con los parámetros de diseño que pueden influirlos, posibilitará la mejora del diseño y el aumento del rendimiento en el tratamiento de aguas residuales en HC (Tabla 1).

Ubicación y principales procesos microbianos

La región activa de los HC se encuentra en la zona de las raíces o rizosfera donde ocurren procesos fisicoquímicos y biológicos, generados por la interacción de plantas, microorganismos, medio y contaminantes [6] (Figura 2).

Los principales mecanismos de remoción de nutrientes de las aguas residuales en HC son procesos microbianos como la nitrificación y desnitrificación. La nitrificación es un proceso en el que el amonio en presencia de oxígeno, se convierte primero en nitrito por bacterias *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* y *Nitrospira* quimiolitotróficas, y después en nitrato, por bacterias *Nitrospira* y *Nitrobacter* quimiolitotróficas facultativas. Por otro lado, la desnitrificación, que es el principal mecanismo de eliminación del nitrógeno total en HC, produce nitrógeno gaseoso, óxido nitroso u óxido nítrico por los grupos facultativos *Bacillus*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Spirillum*. En años recientes, se ha descubierto un proceso microbiano interesante llamado oxidación anaeróbica de amonio (ANAMMOX), facilitado por el grupo planctomycetos, que implica la conversión del amonio en nitrógeno gaseoso, bajo condiciones anaeróbicas, utilizando nitrito como aceptor de electrones [7].

Bioactivación en HC para mejorar la capacidad de remoción

La bioaumentación consiste en adicionar consorcios bacterianos al sistema para incrementar la eliminación de contaminantes, lo que podría favorecer el tratamiento del agua residual, y llevar al desarrollo de sistemas más avanzados y eficientes, por ello, el desarrollo de más estudios que involucren estos procesos a escalas mayores, se vuelve esencial.

Referencias

- [1] Wang, J., Long, Y., Yu, G., Wang, G., Zhou, Z., Li, P., Zhang, Y., Yang, K., & Wang, S. (2022). A Review on Microorganisms in Constructed Wetlands for Typical Pollutant Removal: Species, Function, and Diversity. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845725>
- [2] Fester, T. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi in a wetland constructed for benzene-, methyl tert-butyl ether- and ammonia-contaminated groundwater bioremediation. *Microbial Biotechnology*, 6(1), 80–84. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2012.00357.x>
- [3] Wang, Y., Chen, P., Yu, X., & Zhang, J. (2022). Algae-bacteria symbiotic constructed wetlands for antibiotic wastewater purification and biological response. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1044009>
- [4] Alexandros, S. I., & Akratos, C. S. (2016). Removal of Pathogenic Bacteria in Constructed Wetlands: Mechanisms and Efficiency. In *Phytoremediation* (pp. 327–346). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41811-7_17
- [5] Shingare, R. P., Thawale, P. R., Raghunathan, K., Mishra, A., & Kumar, S. (2019). Constructed wetland for wastewater reuse: Role and efficiency in removing enteric pathogens. *Journal of Environmental Management*, 246, 444–461. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.157>
- [6] Stottmeister, U., Wießner, A., Kuschik, P., Kappelmeier, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R. A., & Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22(1–2), 93–117. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>
- [7] Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of Environmental Management*, 112, 429–448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>

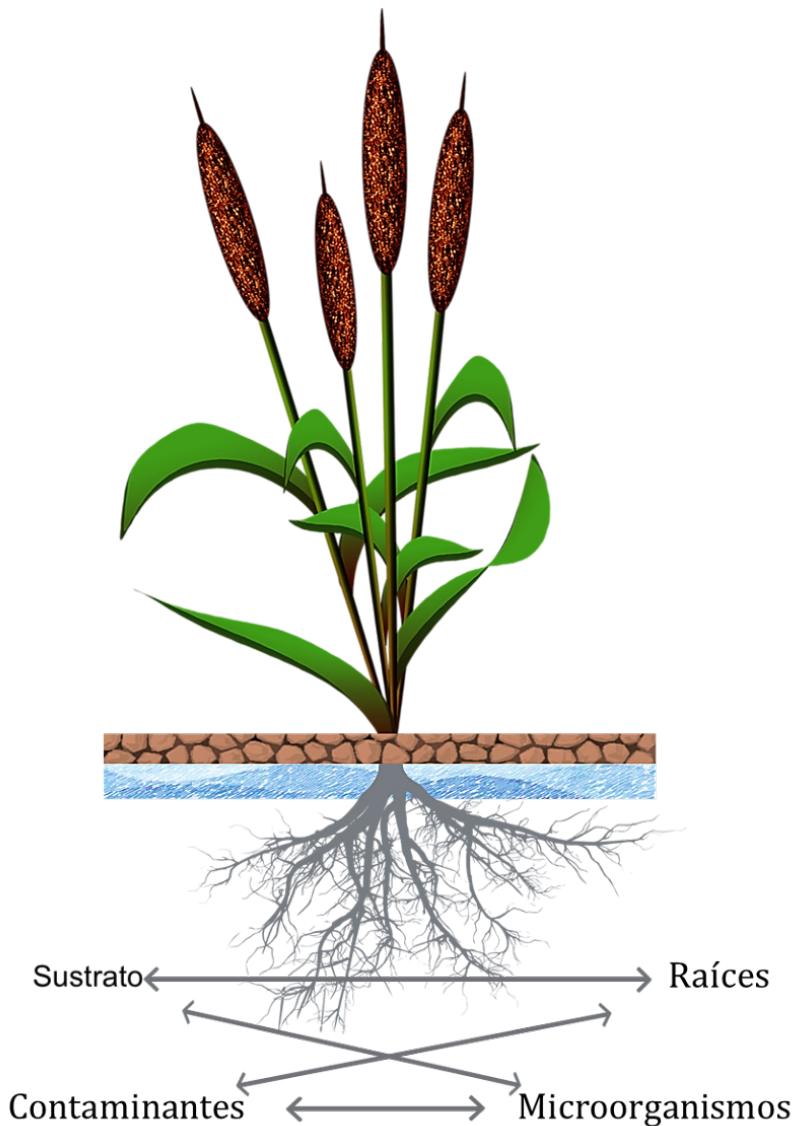


Figura 2. Interacciones en la zona radicular de las plantas en HC (Modificado de Stottmeister et al., 2003).

Conclusiones

La búsqueda de soluciones para el tratamiento de aguas residuales en áreas en desarrollo destaca la importancia de tecnologías eficientes y sostenibles. Los HC ofrecen una opción prometedora, aprovechando procesos naturales para purificar el agua, como la colaboración de microorganismos, ya que estos son los principales encargados de la descomposición y transformación de contaminantes presentes en el agua residual. Conocer ampliamente sus funciones y la correlación con otros factores que pueden influir en los procesos, puede mejorar significativamente la eficacia de los HC. Sin embargo, enfoques como la bioactivación, necesitan aún más investigación,