

Los humedales construidos como estrategia de reúso de aguas residuales de cooperativas escolares rurales en agricultura

José Antonio Fernández-Viveros ¹, Jacel Adame-García ¹, Saúl Rivera ², Félix David Murillo-Cuevas ¹ y Mayerlin Sandoval-Herazo ^{1,3,*}

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, Carretera Cd Cardel-Chachalacas km 4.5, Úrsulo Galván 91667, Veracruz, México

² Laboratorio de Humedales y Sustentabilidad Ambiental, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Tecnológico Nacional de México, Km. 1.8 Carretera a la Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

³ Facultad de Ingeniería / Universidad de Sucre, Carrera 28 No. 5-267, 700001 Sincelejo, Sucre, Colombia

* Autor de correspondencia: mayerli.sandoval24@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 4 de noviembre de 2025

Aceptado: 18 de diciembre de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.654>

Resumen: El aumento poblacional ha intensificado la presión sobre los recursos hídricos, provocando su sobreexplotación y contaminación. Este fenómeno ha reducido la disponibilidad de agua de calidad para distintos usos. En zonas rurales, esta problemática se agrava por la escasez de fuentes y la falta de sistemas de saneamiento, afectando tanto la salud pública como los ecosistemas. Una de las principales fuentes de contaminación en estos entornos son las aguas residuales domésticas generadas en cooperativas o cafeterías de instituciones educativas rurales, que, al no recibir tratamiento adecuado, deterioran el suelo y los cuerpos de agua. La carencia de infraestructura (falta de sistemas de drenaje en zonas rurales), el desconocimiento técnico y la falta de apoyo institucional profundizan esta situación, evidenciando una brecha en la gestión ambiental rural. No obstante, estas aguas contienen nutrientes como nitrógeno y fósforo, que pueden aprovecharse en la agricultura mediante tecnologías sostenibles. En este contexto, los humedales construidos se reconocen por su fácil operatividad, escalabilidad en contextos rurales, bajo costo y alta eficiencia en la eliminación de contaminantes de aguas residuales domésticas. Este estudio analiza el tratamiento descentralizado de las aguas residuales en instituciones educativas rurales para tratar y reutilizar aguas residuales en el riego agrícola, promoviendo la economía circular, la educación ambiental, la participación comunitaria en la gestión del agua y la autosuficiencia alimentaria en las escuelas rurales debido a que en estas instituciones es común el uso de huertos escolares y grandes extensiones de áreas verdes.

Palabras clave: Cooperativas instituciones rurales, humedal construido, infraestructura descentralizada

Introducción

El agua es un recurso vital que de manera natural es el más abundante en la Tierra. Sin embargo, a pesar de ser esencial para la vida en los ecosistemas, el crecimiento poblacional de los últimos años ha aumentado la presión sobre los recursos hídricos, produciendo su sobreexplotación y contaminación. Este fenómeno se traduce en una preocupante disminución de la disponibilidad de agua de calidad para los diferentes usos humanos, agrícolas e industriales (Álvarez-Álvarez *et al.*, 2024). Las regiones rurales por la escasez de sus fuentes hídricas y sus sistemas de saneamiento deficientes, aumentan los efectos de esta crisis, afectando tanto la salud pública como los ecosistemas locales.

Entre las fuentes de contaminación hídrica más frecuentes en el medio rural se encuentran, las aguas residuales domésticas, particularmente aquellas generadas en cooperativas y cafeterías de instituciones educativas. Estos efluentes contienen materia orgánica, grasas y nutrientes que, al ser vertidos sin tratamiento adecuado, contribuyen a la degradación del suelo y de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Saldías & Rodríguez, 2025). En muchos planteles educativos rurales, los sistemas de tratamiento convencionales son ineficientes o inclusive inexistentes, debido al desconocimiento técnico, los costos elevados o la falta de acompañamiento institucional (Rodríguez, 2024). Esta situación, representa una fuente puntual de contaminación ya que las aguas residuales se descargan directamente en el entorno cercano a la escuela, generando un riesgo sanitario directo para la comunidad estudiantil. Estas particularidades hacen necesario un análisis diferenciado, ya que su manejo inadecuado puede impactar tanto la salud escolar como las prácticas agrícolas locales por la existente infraestructura sanitaria y gestión ambiental en comunidades rurales. Esta situación inclusive se agrava, si se suman problemas como la escasez de agua potable, sanitarios inadecuados e insumos para un correcto lavado de manos (Vazquez, 2024). A pesar de representar un problema, las aguas residuales también contienen nutrientes aprovechables como nitrógeno y fósforo, los cuales pueden transformarse en recursos útiles para la producción agrícola si se gestionan de manera adecuada (Echeverría *et al.*, 2024). Los Humedales Construidos emergen como una alternativa ecológica y de bajo costo para el tratamiento

descentralizado de aguas residuales. Estos sistemas ecotecnológicos simulan los procesos naturales de depuración mediante la interacción entre plantas, microorganismos y sustratos, logrando una alta eficiencia en la remoción de contaminantes y representa una simplicidad tecnológica que permite su implementación comunitaria, promoviendo la participación de estudiantes, docentes y personal de mantenimiento en su operación y cuidado (Zurita-Martínez & Sandoval-Herazo, 2024). De este modo, se fortalecen las capacidades locales, se fomenta la apropiación social del conocimiento y se contribuye a cerrar la brecha entre la gestión del agua y la educación ambiental en instituciones rurales.

Desarrollo

¿Qué son los humedales construidos?

Los humedales construidos son sistemas ecológicos de tratamiento que imitan las condiciones de humedales naturales en sus funciones de depuración de aguas, donde la depuración se produce mediante la combinación de las plantas acuáticas, los microorganismos, y los medios filtrantes como grava, arena, suelo, que en conjunto eliminan los contaminantes del agua mediante métodos fisicoquímicos (sedimentación, filtración, decantación, degradaciones químicas indirectas y adsorción química).

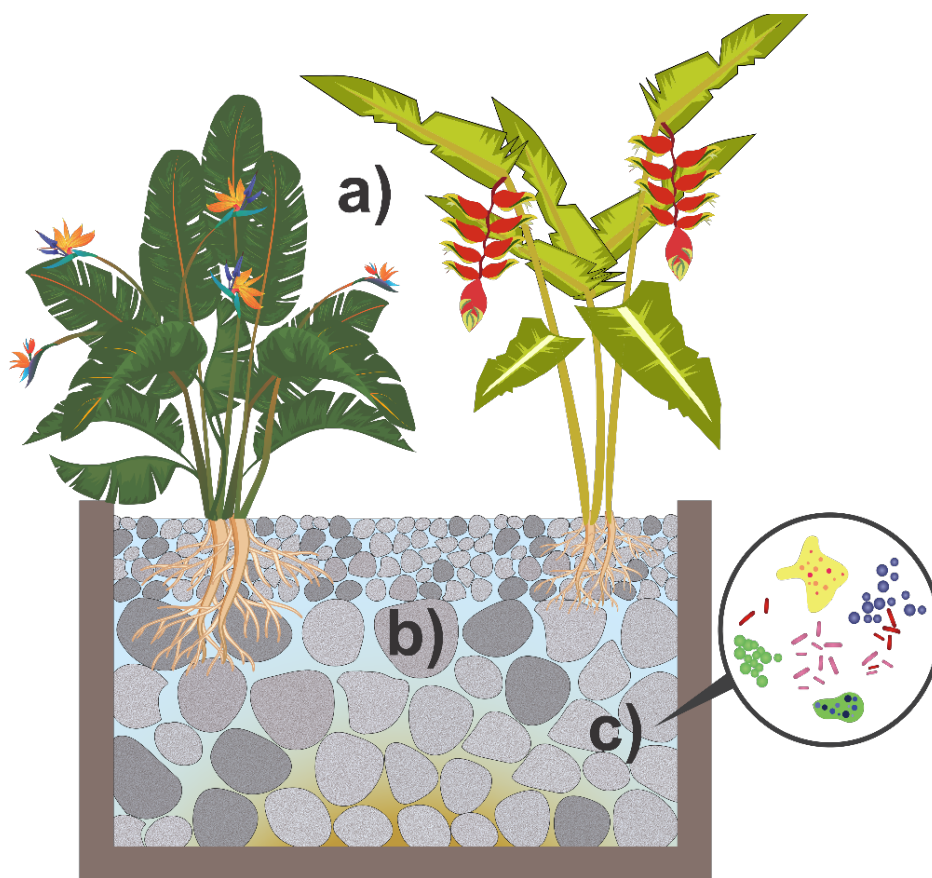


Figura 1. Principales componentes de un Humedal Construido: (a) vegetación, (b) medio filtrante y (c) microorganismos, modificado de (Zurita-Martínez & Sandoval-Herazo, 2024)

Según el diseño del sistema, se pueden clasificar de manera general como humedales de flujo superficial o subsuperficial (Figura 2), los cuales poseen características que se adaptan a las condiciones climáticas y socioeconómicas de la localidad (Roy *et al.*, 2025). Los Humedales Construidos pueden ser empleados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, agroindustriales, industriales, son económicos, fáciles de implementar y operar, no necesitan energía para su funcionamiento y se integran al paisaje urbano y rural (Zurita-Martínez & Sandoval-Herazo, 2024). Como desventajas encontramos que para su construcción es necesario utilizar grandes superficies.

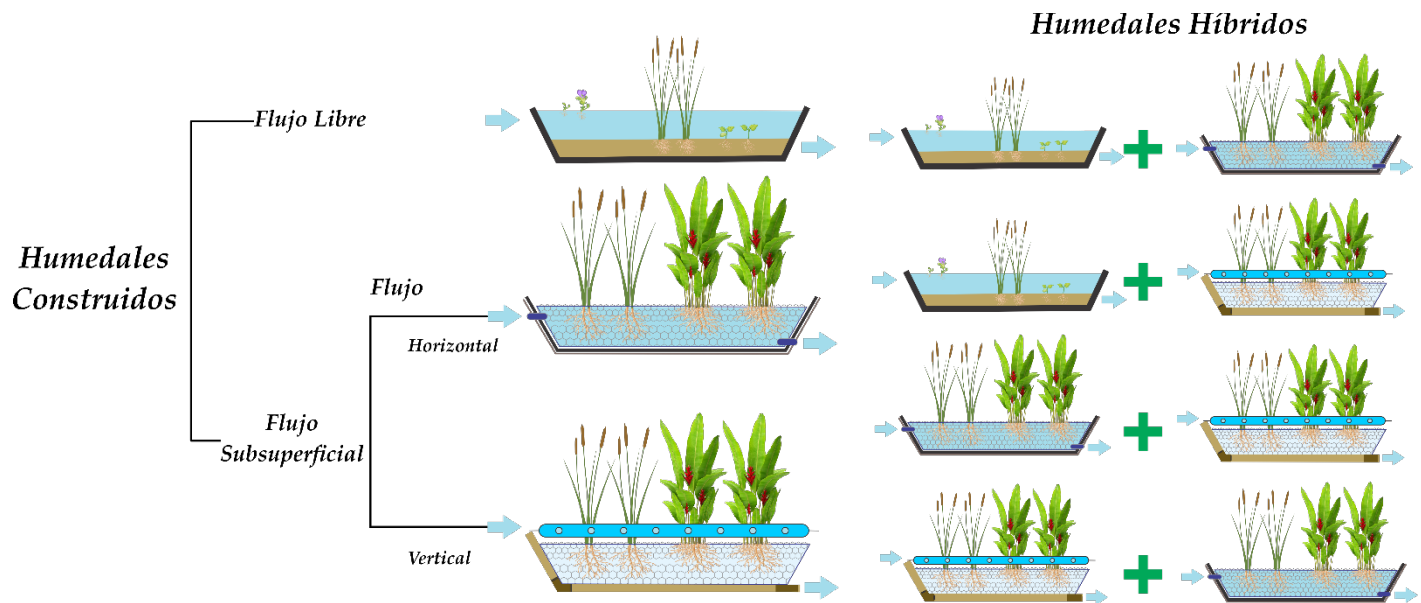


Figura 2. Clasificación de Humedales Construidos, modificado de (Zacarias *et al.*, 2025)

Su éxito en el contexto mexicano radica en su bajo coste de construcción y operación, la simplicidad del mantenimiento y su eficacia considerando la eliminación de contaminantes, tanto orgánicos como nutrientes.

Retos del agua en el sector rural

México vive una crisis hídrica progresiva por el crecimiento de la población, la expansión agrícola y la contaminación de los cuerpos de agua. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reporta que más del 40 % de la población rural no tiene sistemas de saneamiento, lo que repercute negativamente en la calidad ambiental y en la salud pública (CONAGUA, 2023).

En el ámbito educativo, muchas escuelas rurales cuentan con cooperativas escolares que generan aguas residuales provenientes de cocinas, lavaderos y sanitarios que, al no recibir tratamiento, contaminan los suelos y cuerpos de agua cercanos. El manejo de las aguas residuales de las cooperativas escolares en localidades rurales, es un reto ambiental y social que pone de manifiesto las desigualdades debido a las infraestructuras sanitarias y el acceso al agua, los sistemas de tratamiento convencionales son insuficientes o inexistentes (Moore *et al.*, 2025).

Estas situaciones han impulsado diversos estudios e iniciativas que buscan soluciones sostenibles y adaptadas a las condiciones locales, tales como la implementación de Humedales Construidos (Jerez, 2024). En la Tabla 1, se puede visualizar estudios en los que se evidencia que los Humedales Construidos implementados como sistemas de tratamiento descentralizados en cooperativas de instituciones educativas rurales. Estos sistemas demuestran ser eficientes en la depuración del agua, permiten el cumplimiento de la normatividad vigente para el reúso de aguas en riego de áreas verdes o para la agricultura, así mismo se evidencia la formación ambiental en el ámbito escolar.

Estas experiencias internacionales pueden ser usadas como referencia para cooperativas escolares rurales mexicanas, que pretenden impulsar la educación ambiental, el ahorro de agua y la producción sostenible a partir de soluciones basadas en la naturaleza. La mayoría está orientada al tratamiento de aguas residuales procedente de lavamanos, duchas y lavanderías escolares o aguas residuales domésticas escolares asumidas posteriormente en actividades no potables.

Tabla 1. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales escolares

Tipo de humedal	Agua tratada	Tipo de vegetación	Reúso del agua	País	Referencia
Humedal de flujo subsuperficial horizontal (piloto)	Aguas residuales domésticas escolares, incluye aguas negras y grises.	<i>Ruellia brittoniana</i> , <i>Pennisetum setaceum</i>	Riego de jardines, huertos escolares y áreas recreativas	México	(Reynoso <i>et al.</i> , 2021)
Humedal híbrido de flujo horizontal y vertical (piloto)	Aguas grises y aguas residuales domésticas escolares	<i>Typha latifolia</i>	Riego de áreas verdes, jardines educativos	Zimbabue	(Alufasi <i>et al.</i> , 2024)
Humedal híbrido de flujo vertical y horizontal híbrido	Aguas residuales de baños, lavamanos y lavandería escolares	<i>Typha latifolia</i> , <i>Cyperus papyrus</i> , <i>Scirpus cyperinus</i> , <i>Canna indica</i>	Riego de huertos escolares y mantenimiento de jardines; uso pedagógico como aula viva	Cuba	(García <i>et al.</i> , 2024)
Humedales construidos	Aguas residuales cafetería	<i>Hymenocallis littoralis</i> , <i>Chlorophytum comosum</i> , <i>Duranta erecta</i>	Riego de jardines y áreas recreativas	India	(Dhaduti <i>et al.</i> , 2025)

En México, el Humedal Construido en el IT Boca del Rio, tiene 7 celdas de tratamiento con un caudal de 31.50 m³/d, en una superficie de construcción de 157 m². Esta capacidad es suficiente para una población de 3000 personas. Los parámetros monitoreados demuestran que el Humedal Construido cumple con los requerimientos que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 cumpliendo con los límites establecidos para el reúso agrícola (Vazquez, 2024). Otros sistemas como humedales construidos en África mostraron viabilidad técnica, económica y ambiental sobre el tratamiento de aguas residuales, pero con relación a la absorción de contaminantes y la oxigenación del agua, demuestran que la vegetación en humedales escolares juega un rol clave para la remoción de materia orgánica y de fósforo. Zimbabue ha promovido la realización de un aprendizaje activo sobre el ciclo del agua y la gestión responsable de los recursos hídricos (Alufasi *et al.*, 2024). Todas estas experiencias han evidenciado cómo la educación ambiental, la participación de los estudiantes y la innovación tecnológica confluyen en una propuesta de solución a los problemas que producen las aguas residuales en contextos escolares rurales y urbanos (Bautista *et al.*, 2025). El tratamiento de aguas residuales en la escuela no representa solo un tema técnico, sino también una oportunidad educativa para mejorar la toma de conciencia en torno al agua. La implementación de humedales construidos en este tipo de contexto se convierte en una acción educativa, ecológica y demostrativa, que permite que los estudiantes tengan la oportunidad de participar activamente en el control, mantenimiento y evaluación del sistema, lo que posibilita el fortalecimiento de su conciencia ambiental y el entendimiento acerca de los procesos naturales de tratamiento. Las instituciones educativas rurales que implementan sistemas de tratamiento con participación de la comunidad educativa son entornos claves para inculcar valores ambientales y crear una conciencia sobre el uso y el manejo de aguas residuales (Sacoto *et al.*, 2025). Cada cooperativa e institución educativa puede convertirse en un ejemplo de cambio cuando enseña a sus estudiantes que el agua, incluso la que desechamos, puede tener un nuevo uso si se maneja correctamente.

Reúso del agua tratada en agricultura

El reúso de aguas purificadas en el sector agrícola posibilita el aprovechamiento de los nutrientes que contiene el efluente tratado, permitiendo así reducir el uso de fertilizantes químicos. Las cooperativas escolares pueden realizar el riego de huertos didácticos, áreas verdes y cultivos de hortalizas a partir del reúso de aguas tratadas dentro de la propia cooperativa para reiniciar el ciclo del agua. La FAO sostiene que el reúso seguro del agua tratada en la agricultura puede disminuir hasta en un 25 % el uso de agua dulce en comunidades rurales, pero también fomenta la seguridad alimentaria (FAO, 2020). México ha sido pionero en el reúso de el agua residual y tratada (Cisneros Estrada, 2018),

Bolivia utilizó como base la NOM-003-SEMARNAT-1997 para las restricciones en cuanto a cultivos que es posible regar de acuerdo con la calidad del agua (Figura 3).

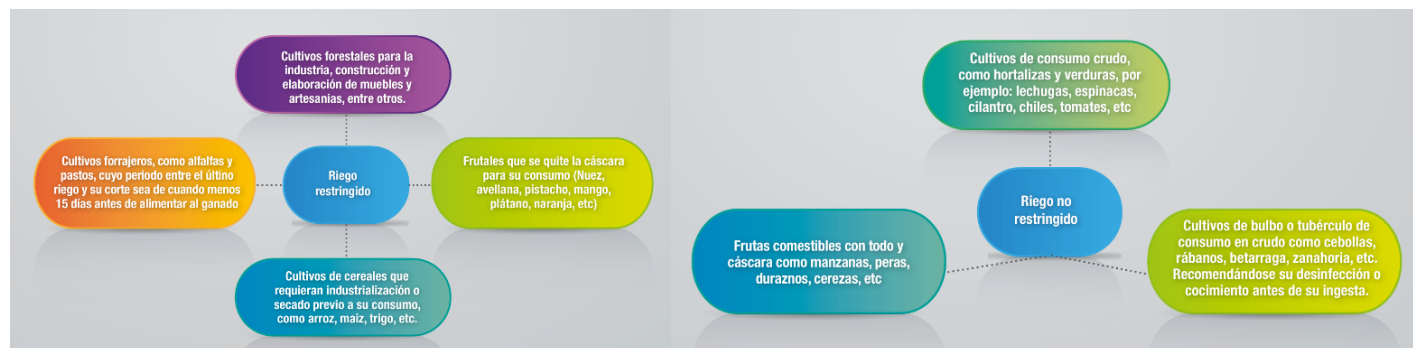


Figura 3. Tipos de riego según la calidad del agua para usos agrícolas (Cisneros Estrada, 2018)

Además, en el caso del estado de Veracruz, se ha visto que el reúso de aguas en humedales construidos mejora la productividad del suelo y también fomenta la conservación del microbiota del suelo (Melgarejo Galindo *et al.*, 2025).

Conclusiones

Los humedales construidos representan una alternativa tecnológica apropiada, sostenible y pedagógica para el tratamiento de aguas residuales en cooperativas escolares rurales de México. Su implementación ofrece beneficios ambientales y sociales, al reducir la contaminación local, facilitar el reúso agrícola del agua y fortalecer la educación ambiental comunitaria. El aprovechamiento del agua tratada para riego en huertos escolares no solo optimiza los recursos hídricos, sino que también promueve una agricultura educativa sostenible, que contribuye a la formación de generaciones comprometidas con el cuidado del ambiente. En el contexto mexicano, impulsar el uso de humedales construidos en el ámbito educativo rural es una oportunidad para vincular el conocimiento científico con la acción comunitaria, avanzando hacia modelos de gestión del agua más resilientes, inclusivos y sustentables.

Bibliografía

- Cisneros Estrada, X. (2018). *Guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Recuperado de <http://www.mmaya.gob.bo>
- Alufasi, R., Parawira, W., Zvidzai, C. J., Stefanakis, A. I., Musili, N., Lebea, P., Chakauya, E., & Chingwaru, W. (2024). Performance evaluation of a pilot-scale constructed wetland with *Typha latifolia* for remediation of domestic wastewater in Zimbabwe. *Water*, 16(19), 2843. <https://doi.org/10.3390/w16192843>
- Álvarez-Álvarez, M. J., Moreno-Ponce, L. A., & Regalado-Jalca, J. J. (2024). Impacto ambiental asociado a factores antropogénicos: Incidencia en la economía de las cuencas hidrográficas. *MQR Investigar*, 8(4), 2158–2180. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.2158-2180>
- Bautista, J. I. Q., Campos, L. C., Trejos, B., & Bogush, A. (2025). Exploring rural school students' perceptions, willingness, motivations, and concerns regarding greywater treatment and reuse in southern Peru. *Sustainable Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2440960>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. CONAGUA.
- Dhaduti, M., Dhaduti, S., Budapanahalli, S., Kadabnakatti, S., & Hubballi, S. (2025). Treatment of college canteen sullage using microcosm phytoid system. *Acta Periodica Technologica*, 56, 187–196. <https://doi.org/10.2298/APT250410013D>
- Echeverría, I., Aliaga, G., & Saavedra, O. (2024). Evaluación de calidad de agua residual tratada para riego en el Valle Alto de la ciudad de Cochabamba. *Revista Investigación & Desarrollo*, 24(1), 35–45. <https://doi.org/10.23881/idupbo.024.1-3i>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *The state of food and agriculture 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- García, M. B., Álvarez, P. P., & García, Y. L. (2024). Propuesta de tratamiento de residuales domésticos mediante humedales artificiales en comunidades rurales. Centro de Medio Ambiente y Desarrollo. Recuperado de <https://cmad.ama.cu>
- Jerez, M. J. H. (2024). *Servicio circular polifuncional de tratamiento de aguas rural: Sistema de humedales construidos como infraestructura medioambiental para Lo Abarca* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/ARQ/88323>
- Melgarejo Galindo, L., Melgarejo Galindo, D., & López Barradas, M. (2025). Clasificación y reutilización del agua como estrategia de cuidado ambiental en el ámbito social y empresarial. *Anuario de Ciencias Sociales*, 5(5), 76–88. <https://doi.org/10.20983/acs.2024.1.6>
- Moore, N., Pousty, D. S., Ma, D., Hofmann, R., Pras, A., Higbee, R. E., Mamane, H., & Beck, S. E. (2025). Decentralized UV disinfection systems in rural areas or low-resource contexts: A case study compilation. *Environmental Science: Water Research & Technology*. <https://doi.org/10.1039/D4EW00822G>

- Reynoso, F. L., Del Moral, M., & Castañeda Chávez, R. (2021). Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Boca del Río: Escalamiento. *Foro Virtual "El Uso Adecuado del Agua Residual y Otras Medidas para Mitigar la Escasez de Agua en Tiempo de Sequía"*, 59, 968–987.
- Rodríguez, M. de los Á. M. (2024). Aspectos generales para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 12011–12024. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13378
- Roy, M. B., Saha, S., & Kumar Roy, P. (2025). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecology, Economy and Society – The INSEE Journal*, 8(1), 13–54. <https://doi.org/10.37773/ees.v8i1.1281>
- Sacoto, E. C. A., Ullauri Bermeo, C. P., Zea Cobos, A. G., Sánchez Dumas, J. S., Chaca Cordero, V. A., Parra Segovia, S. K., Cisneros Jerves, F. E., Pesántez Yépez, M. E., & Vega Medina, J. I. (2025). *Reinventar la ciudad: Soluciones verdes y equidad social para comunidades sostenibles*. SPUE. <https://doi.org/10.17163/abyaups.129>
- Saldías, C., & Rodríguez, M. (2025). Avances y desafíos del tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina: Revisión sistemática 2013–2024. *Revista Investigación & Desarrollo*, 25(1), 5–20. <https://doi.org/10.23881/idupbo.025.1-1j>
- Vázquez, R. (2024). Ab-Revista de Abogacía. *Ab-Revista de Abogacía*, 15, 61–78. Recuperado de <https://www.unicef.org>
- Zacarías, M. A. P., Sandoval-Herazo, M., Adame-García, J., & Rivera, S. (2025). Humedales construidos: Un aliado para la conservación y el desarrollo sostenible. *PaCiencia Pa' Todos*, 17, 93–97. <https://publicaciones.aragon.unam.mx/ojs/index.php/paciencia/article/view/115>
- Zurita-Martínez, F., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 6–10. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.186>