

## Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión Pollutant Removal in Subsurface Flow Artificial Wetlands: A Review

Josué Nava-Rojas<sup>1</sup> , Fabiola Lango-Reynoso<sup>1</sup> ,  
María del Refugio Castañeda-Chávez<sup>1†</sup> y Christian Reyes-Velázquez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río. Carretera Veracruz-Córdoba km 12. 94290 Boca del Río, Veracruz, México; (J.N.R.), (F.L.R.), (M.R.C.C.), (C.R.V.).

† Autora para correspondencia: mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx

### RESUMEN

Los humedales artificiales son eficaces en la eliminación de diversos contaminantes de las aguas residuales. En este trabajo de revisión, se buscó analizar las últimas perspectivas sobre los humedales artificiales de flujo subsuperficial, los que utilizan diferentes metodologías para el tratamiento de efluentes contaminados. Para alcanzar este objetivo, se realizó una búsqueda de información empleando filtros basados en palabras clave, durante el período comprendido del año 2015 al 2021. Se examinaron alrededor de 60 estudios relacionados con los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, destacando en los resultados obtenidos los mecanismos de eliminación de contaminantes. Se han obtenido mejoras significativas en sistemas a escala de laboratorio o piloto, pero se debe profundizar en el proceso de escalamiento de estas tecnologías en diferentes configuraciones, para una eficiente eliminación y reducción óptima de diferentes contaminantes.

**Palabras clave:** depuración, microorganismos degradadores, sustrato, tratamiento de efluentes.

### SUMMARY

Artificial wetlands are effective in removing various contaminants from wastewater. In this review study, the latest perspectives on subsurface flow artificial wetlands are analyzed, which use different methodologies for treating contaminated effluents. To achieve this objective, an information search was conducted using keyword filters, during the period from 2015 to 2021. Approximately, 60 studies related to horizontal subsurface flow artificial wetlands were examined, highlighting in the results the mechanisms of contaminant removal. Significant improvements have been obtained in laboratory or pilot scale systems, but the scaling process of these technologies in different configurations should be further explored for efficient elimination and optimal reduction of different contaminants.

**Index words:** purification, degrading microorganisms, substrate, effluent treatment.

### INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales (HA), también conocidos como humedales construidos, son sistemas de tratamiento de aguas residuales que contienen diversos contaminantes y son diseñados para imitar los procesos de retención de nutrientes, filtración para mejorar la calidad del agua como ocurre en los humedales naturalmente (López, Fuenzalida, Vera, Rojas y Vidal, 2015; Zhao *et al.*, 2019; Vymazal, 2010). Estos sistemas surgieron en los Países Bajos a finales de la década de 1960, y en Norteamérica en la década de 1970 para tratar todo tipo de aguas residuales (Vymazal, 2010).



#### Cita recomendada:

Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1715. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>

Recibido: 24 de marzo de 2023.  
Aceptado: 22 de agosto de 2023.  
Revisión. Volumen 41.  
Noviembre de 2023.

Editor de Sección:  
Dr. Fabián Fernández Luqueño

Editor Técnico:  
Dr. Benjamín Zamudio González



**Copyright:** © 2023 by the authors.  
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

El aumento constante de los efluentes industriales no tratados o parcialmente tratados, el acelerado desarrollo social, la falta de sistemas de saneamiento para eliminar los efluentes industriales y agrícolas, ha generado preocupación por la elevada contaminación del agua en los países en desarrollo (Kirui, Wu, Lei y Dong, 2015; Varma, Gupta, Ghosal y Majumder, 2021).

En paralelo, la contaminación de flujos y cuerpos de agua debido a la descarga de aguas domésticas, industriales y agrícolas sin tratamiento, ha surgido como un gran desafío, especialmente en el contexto del crecimiento demográfico (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019; Chand, Suthar y Kumar, 2021; Sakurai, Pompei, Tomita, Santos y Silva, 2021). Es urgente de implementar medidas adecuadas de tratamiento y saneamiento para prevenir una mayor contaminación del agua y proteger el medio ambiente.

Los HA son utilizados en la retención de nutrientes y materia orgánica en aguas residuales domésticas y municipales, aguas pluviales y escorrentías agrícolas, y pueden eliminar una gran variedad de contaminantes, como nitrógeno, fósforo, orgánicos, sólidos, metales y coliformes, mediante plantas, medios, agua a granel y población de biomasa (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019; Saeed y Sun, 2012). Los HA ofrecen condiciones para el desarrollo de microorganismos encargados de la filtración y adsorción de contaminantes, lo que les permite alcanzar estándares de calidad de acuerdo con la normativa aplicable en materia de agua (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019). El objetivo de esta revisión fue analizar bibliografía reciente sobre el tratamiento de efluentes contaminados a partir de las diferentes metodologías utilizadas en humedales artificiales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda bibliográfica a nivel internacional de artículos publicados en bases de ScienceDirect de Elsevier, Springer, SciELO, Redalyc y Google Scholar. La búsqueda se delimitó a estudios publicados en el período entre de 2015 al 2021. Palabras de búsqueda en inglés y español, fueron: "constructed wetlands", "subsurface flow", "degrading microorganisms", "organic matter", "depuration" y "substrate". Se aplicaron filtros para eliminar trabajos no directamente relacionados a concepto de humedal artificial (HA). De la lectura crítica se eliminaron artículos no pertinentes. Finalmente, se recopilaron 60 estudios de investigación para esta revisión con el objetivo de establecer el estado de arte de esta línea de investigación y tecnología aplicada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Humedales Artificiales

Los humedales artificiales (HA) son áreas saturadas por aguas superficiales o subterráneas que mantienen especies de plantas adaptadas a suelos saturados con lecho rocoso y sedimentos finos, y con vegetación emergente que facilita la formación de biopelículas y la transferencia de oxígeno Sierra-Pech y López-Ocaña (2013). Los HA se pueden clasificar en humedales de flujo libre (HAFL) y de flujo subsuperficial (HAFS) por el tipo de régimen de flujo de agua, y por el tipo de macrófitas instaladas en el humedal (emergentes, flotantes y sumergidas) (Solís-Silvan, López, Bautista, Hernández y Romellón, 2016).

Saeed y Sun (2012), clasifican los humedales en dos categorías: de flujo vertical y flujo horizontal. Son más eficientes los sistemas de superficie en la eliminación de contaminantes (Araque-Niño, Britto, Cuellar, y Perico, 2018) y evaluaron la eficiencia en eliminación de contaminantes, materia orgánica, nutrientes, fármacos y microorganismos patógenos en diferentes configuraciones de HA con el objetivo de destacar las características más innovadoras y los puntos deficientes.

Los HAFS han sido ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de sólidos y materia orgánica lo que es comprobado analíticamente mediante la medición de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y la demanda química de oxígeno (DQO) (López *et al.*, 2015). Carballeira, Ruiz y Soto (2017) mencionan este tipo de humedales son más simples y de baja tecnología mecánica en el tratamiento de aguas residuales por lo cual se adoptan en países en vías de desarrollo. Los HA presentan ventajas técnicas, económicas y socialmente aceptables, como bajos costos de implementación, operación y mantenimiento,

y no presentan problemas de olores o plagas (Saeed y Sun, 2012). Además, en casos de bajas temperaturas, pueden brindar protección térmica al sistema gracias a la vegetación y el sustrato (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019). Por otro lado, Witthayaphirom *et al.* (2020) señalan que los humedales artificiales (HA) han sido efectivamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales en climas tropicales. Esto se debe a diversos factores, como las altas temperaturas, la humedad, el crecimiento vegetal, la radiación solar y el incremento de la actividad microbiana. Según Carballeira *et al.*, (2017), uno de los problemas relacionados con la operación de los HAFS (vertical u horizontal) es la obstrucción de los medios granulares por la acumulación de distintos tipos de sólidos, lo que reduce la infiltración y porosidad del medio utilizado, lo que merma la eficiencia del tratamiento y reduce la vida útil del HA. A pesar de estos problemas, el tratamiento de aguas residuales mediante HA se ha convertido en una tecnología confiable en las últimas décadas debido a sus bajos costos y grandes beneficios para la eliminación de contaminantes de diferente naturaleza (Wu *et al.*, 2015).

Según Wu *et al.* (2015), las técnicas aplicadas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales se basan en los siguientes principios: aislamiento térmico, operación de flujo de marea, paso de alimentación, recirculación de efluentes, suministro de fuentes de carbono externas, cosecha de biomasa, bioaumentación, adición de lombrices de tierra, torres híbridas, aireación artificial, corredor de flujo circular, flujo subterráneo desconcertado, celda de combustible microbiana acoplados, electrólisis integrada y reactor biológico combinado. Cada una de estas tecnologías conlleva ventajas y desventajas. De las primeras se anotan: aplicación a condiciones de masa, manejo y volumen, grado de contaminación, inversión económica y de tiempo de remediación, operación sostenida en invierno para zonas templadas, menores costos de capital y operación que los sistemas aireados, utilización más eficaz de toda la superficie de los humedales y evitar una rápida obstrucción, mejora del rendimiento especialmente para el tratamiento de aguas residuales de alta resistencia, mejora significativa de la desnitrificación, incrementar la diversidad ambiental y evitar la re-liberación de nutrientes de la vegetación en descomposición, acortamiento del período de adaptación y aceleración de las tasas de biodegradación, reducción del problema de las obstrucciones, eliminación efectiva de COD y TN al proporcionar sus respectivas ventajas de CW SSF y FWS, nitrificación eficaz con suficiente oxígeno y aumento de las cargas de aguas residuales aplicadas, evitar el efecto adverso de la baja temperatura y retrasar la obstrucción de los sistemas, proporcionar múltiples condiciones aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas secuencialmente en el mismo sistema, producir energía renovable mediante la conversión de energía química en energía eléctrica durante el tratamiento de aguas residuales, eliminación de fósforo, control de olores, y reducir la obstrucción. Por otra parte, las desventajas en algunos casos de adoptar algunos principios tecnológicos son: la construcción del aislamiento aumentaría los costes de inversión, pueden ocurrir un problema de obstrucción, podría surgir la segunda contaminación del efluente tratado, más energía para bombear, incremento de los costos y el problema potencial de incrementar la concentración de orgánicos en el efluente, dificultad en la optimización de la estrategia de recolección, rendimiento variable en sistemas a gran escala, ineficaz bajo altas cargas de nutrientes influyentes, más espacio y adquisición de terrenos, más entradas de energía, variable eficacia a largo plazo, más energía para bombear, cambios en el diseño de la pendiente total debido a la ruta de flujo de agua más larga, altas tasas de carga orgánica podrían hacer que el sistema deje de funcionar y la aplicación a gran escala sigue siendo difícil.

## Remoción de Contaminantes

La eliminación de contaminantes en los humedales está influenciada por diversos parámetros, como la temperatura, pH, oxígeno disuelto, vegetación y la combinación de todos ellos (Papaevangelou, Gikas y Tsihrintzis, 2016). De acuerdo con Benny y Chakraborty (2020), los HA con vegetación son eficaces en la eliminación de contaminantes sin afectar negativamente la vegetación. La degradación de los contaminantes involucra mecanismos complejos, incluyendo la absorción, sorción, precipitación, hidrólisis y degradación microbiana (Tian *et al.*, 2020), que reducen los contaminantes orgánicos a compuestos inorgánicos (Benny y Chakraborty, 2020).

Hay procesos de degradación de contaminantes en condiciones anóxicas y con oxígeno en la zona cercana a las raíces y rizomas asociado a la actividad microbiana (Witthayaphirom *et al.*, 2020). Las plantas macrófitas desempeñan diversas funciones beneficiosas en los lechos, como estabilizar su superficie, crear ambientes propicios para la filtración y proporcionar aislamiento térmico contra el frío. Además, favorecen la adsorción de contaminantes y liberan oxígeno y carbono orgánico en la zona de las raíces (Carballeira *et al.*, 2017). Tanto las plantas como los microorganismos trabajan en conjunto para degradar una amplia variedad de contaminantes. Esto ocurre gracias a la formación de consorcios microbianos en la rizosfera, la acción de los exudados de las raíces como sustratos suplementarios, la presencia de nitrógeno en el agua en diferentes formas, la transferencia de oxígeno hacia el suelo y la cinética de degradación realizada por los microorganismos (Ebrahimbabaie y Pichtel, 2021).

Los microorganismos presentes en los HA desempeñan un papel importante en procesos de degradación de los principales contaminantes (Wang, Zhong y Bo, 2018), como: filtración, sedimentación, agregación, adsorción, extinción natural por efecto de la temperatura; toxinas segregadas por las plantas como por otros microorganismos, la composición química del agua, oxidación e interacción de biopelículas (Rampuria, Gupta, Kulshreshtha y Brighu, 2021). De acuerdo con Sánchez (2017), los microorganismos presentes en los HA son vitales en los procesos y reacciones que se desarrollan durante la eliminación de nitrógeno y metales, la oxidación de sulfuros o, de manera más dinámica, a través de los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y el azufre.

En adición, Semenov *et al.*, (2020) indican que la presencia de microorganismos autóctonos y alóctonos en las comunidades microbianas, especialmente los autóctonos, son los responsables de muchos procesos relacionados con la purificación de aguas residuales en HA. Los microorganismos alóctonos, incluyendo los patógenos, no pueden sobrevivir a las condiciones ambientales del humedal ni desempeñar ninguna función y, por lo tanto, mueren.

La profundidad, la materia orgánica y las propiedades del sustrato influyen en el proceso de degradación por las comunidades microbianas (Tian *et al.*, 2020). Mientras que la transferencia y disponibilidad de oxígeno influye en la biodegradación de contaminantes, reducir la obstrucción generada por la biomasa presente en los efluentes y mejorar la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (Ilyas y van Hullebusch, 2020).

### Remoción de Materia Orgánica

Los humedales artificiales (HA) son una alternativa efectiva para abordar problemas ambientales relacionados con aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes (Angassa, Leta, Mulat, Kloos y Meers, 2018); y funcionan mediante la eliminación de materia orgánica a través de mecanismos de separación, retención, degradación microbiana (Wang *et al.*, 2018).

Para lograr una eliminación eficiente de la materia orgánica, es esencial medir ciertos parámetros analíticos, como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos volátiles (SSV) (López *et al.*, 2015). Por otro lado, Wang *et al.* (2016), simularon el funcionamiento de un HAFSSH en "mesocosmos" y lograron una eficiencia de eliminación del 81% de la DQO en comparación con un humedal control en un período de operación de 8 meses.

En los últimos años, la remoción de nitrógeno y fósforo ha tomado especial atención en los HA. El fósforo puede ser atrapado en las partículas del suelo y sedimentos presentes en el humedal, lo que reduce su concentración en el agua. Las reacciones químicas entre el fósforo y los componentes del suelo pueden precipitarlo, inmovilizándolo. El nitrógeno, logra su eliminación principalmente a través de procesos de desnitrificación bacteriana. Las bacterias presentes en el suelo y en el agua convierten el nitrógeno amoniacal y nitrato en nitrógeno gaseoso, que es liberado a la atmósfera. Además, la vegetación acuática en los humedales también contribuye a la eliminación del nitrógeno al absorberlo y utilizarlo para su crecimiento. Estos procesos combinados hacen que los humedales artificiales sean efectivos en la reducción de los niveles de fósforo y nitrógeno en el agua, se mejora su calidad y ayuda a prevenir problemas de contaminación y eutrofización (Torres-Bojorges, Hernández, Fausto y Zurita, 2017). Saeed y Sun (2012) explican los humedales de flujo subsuperficial utilizan rutas físicas, químicas y biológicas para eliminar contaminantes de los parámetros ambientales y operativos.

La eliminación eficiente del nitrógeno es esencial para evitar la eutrofización y la proliferación de algas en los cuerpos de agua receptores, lo que puede llevar a la degradación del agua (Zhou, Wu, Wang y Wu, 2019; Mustapha, van Bruggen y Lens, 2018). La desnitrificación en zonas aeróbicas y anaeróbicas en la zona radicular de las plantas a través del uso de ha sido destacada como una estrategia para la eliminación de nitrógeno en aguas residuales (Wang *et al.*, 2018). Aregu, Asfaw y Khan (2021) mencionan que la exposición directa de las raíces a los efluentes tratados mejora la absorción de fósforo y nitrógeno, mientras que Mustapha *et al.* (2018) afirman que la presencia de plantas en los humedales artificiales mejora la remoción de nitrógeno. Los sistemas híbridos de HA, que combinan humedales de flujo horizontal y vertical, son efectivos para mejorar la eliminación de nitrógeno al proporcionar condiciones adecuadas para los procesos de nitrificación y desnitrificación (Ilyas y van Hullebusch, 2020).

### Otros Contaminantes

Los contaminantes emergentes (CE) en las aguas superficiales ejercen una presión significativa sobre las plantas de tratamiento. Existe una falta de información sobre la relación entre los niveles de CE y los posibles efectos adversos en la salud de la vida silvestre y los seres humanos (Archer, Petrie, Kasprzyk-Hordern y Wolfaardt, 2017). Entre estos CE, se encuentran fármacos como la cafeína, carbamazepina, diclofenaco, ibuprofeno,

ketoprofeno y naproxeno (Rabello, Teixeira, Gonçalves y de Sá Salomão, 2019), y los humedales artificiales (HA) han demostrado ser una opción viable para tratar estos contaminantes farmacéuticos presentes en las aguas residuales debido a sus características ecológicas y económicas (Li *et al.*, 2016).

Además de los fármacos, los productos de cuidado personal (PCP) también son considerados CE y están recibiendo mayor atención científica. Estos productos, utilizados en la vida cotidiana, contienen una amplia variedad de compuestos orgánicos que llegan a las corrientes de agua a través de diversas vías, como la excreción humana, la eliminación inadecuada, la filtración en basureros, el drenaje o los efluentes industriales (Archer *et al.*, 2017; Ren, Zhang, Wang, Dai y Chen, 2021). Los PCP pueden encontrarse en aguas residuales, ríos y aguas subterráneas, y pueden tener efectos adversos en la cadena alimentaria, lo cual, representa un riesgo para la salud (Rajapaksha *et al.*, 2014; Ren *et al.*, 2021). Sin embargo, debido a sus bajas concentraciones, aún no se han establecido los daños que pueden causar en la salud y en los ecosistemas acuáticos. (Archer *et al.*, 2017).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales no tienen la capacidad de eliminar todos los nutrientes, ya que no fueron diseñados para eliminar micro contaminantes como los fármacos o PCP presentes en aguas superficiales, subterráneas y agua potable, lo que puede resultar en daños desconocidos a la salud de los seres humanos y del ecosistema (Archer *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2021; Sakurai *et al.*, 2021).

Evaluar el riesgo de los contaminantes emergentes puede ser complicado debido a las diferentes concentraciones presentes en aguas ambientales y a la falta de conocimiento sobre sus efectos dañinos (Archer *et al.*, 2017). En este sentido, en el trabajo de Ren *et al.* (2021), se reportaron concentraciones en plantas de tratamiento en la escala de nano y microgramos por litro, aunque los autores indican que aún se desconoce su impacto. Referente a ello, los sistemas híbridos de hábitats acuáticos, en conjunto con los tanques de algas, se consideran pasos de pulido para el tratamiento de aguas residuales y la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes, como los fármacos y los PCP, por mencionar un ejemplo (Rabello *et al.*, 2019).

### Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH)

Se describen a continuación publicaciones relacionadas con los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) y otras configuraciones en orden ascendente desde el año 2015 hasta el 2021. Se anota de la eficacia referidas de las tecnologías de saneamiento, se citan en valores relativos de porcentaje, y para detalles se deberá acudir a fuente bibliográfica original.

Se eliminó la concentración de Nitrobenzeno (NB) para humedales aireados y no aireados un 71% y 82%; y con la adición de glucosa, la concentración de NB disminuyó significativamente en ambas condiciones (Kirui, Wu, Kizito, Carvalho y Dong, 2016). En laboratorio con agua residual sintética se logró la remoción del 99% del nitrobenzeno (NB) con la aireación intermitente y se obtuvo amonio derivado de la degradación (Kirui *et al.*, 2015).

En planta piloto de aguas residuales universitarias se removió MO de 72.5-86.2%, N (65.6-77.1%) y P (61.2-68.9%) en sitios plantados contra MO de 73.2-78.7%, N (30.2-38.2%) y P (17-34.7%) en sitios sin plantas. En la remoción de SST (58.4 a 73.1%) y CT (82.1 a 87.6%) existieron variaciones (Papaevangelou *et al.*, 2016).

En Planta piloto de vertedero la mejor remoción de DQO fue 67% y de metales pesados tuvo del orden de 10-80%. Las especies vegetales mostraron buena respuesta fisiológica al ambiente contaminado al que fueron expuestas (Madera-Parra, 2016).

En ensayo en laboratorio con aguas residuales domesticas la eliminación de DQO, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NT fueron del 95.6, 96.1 y 85.8%, respectivamente. La aireación intermitente aumentó la presencia de bacterias nitrificantes (Fan, Zhang, Guo, Liang y Wu, 2016).

Residuos farmacéuticos en agua se observaron una gran diversidad microbiana en lechos construidos y no construidos, especialmente especies de familias *Flavobacteriaceae*, *Methylococcaceae* y el género *Methylocystis*; especies anaeróbicas de la familia *Spirochaetaceae* y el género *Clostridium Sensu Stricto* y del *Ignavibacterium* Y. (Li *et al.*, 2016).

En Planta funcional de tratamiento de aguas residuales, con tres sistemas se alcanzó a eliminar el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> del orden de 75.75 a 80.5%, NT de 34.17 a 47.5%, y DQO de 71.43 a 81.07% con respecto al humedal control. La eficiencia de eliminación de NO<sub>3</sub> en los tres sistemas fue de 33%. En el análisis de la comunidad microbiana detectaron un total de 24 filos, *Proteobacteria* y *Bacteroidetes* como especies dominantes (Wang *et al.*, 2016).

En Planta funcional de descargas de granja porcina con obstrucción de filtro de medio poroso del sustrato, se observaron cambios en el rendimiento de la materia seca del humedal con la primera especie vegetal evaluada y con una segunda especie vegetal no la pudieron analizar por problemas operacionales (Baptistini *et al.*, 2016). Por otra parte, también se observó la obstrucción por sólidos en el medio poroso en Planta Piloto de aguas residuales universitarias y las diferencias en la acumulación de sólidos intersticiales en la grava y las características

de los sólidos entre los humedales plantados y no plantados no fueron significativas. La tasa de acumulación de sólidos totales fue de  $1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ . Las condiciones aeróbicas redujeron la acumulación de sólidos. Se observaron lixiviaciones excesivas de carbono orgánico (Carballeira *et al.*, 2017).

El químico fenantreno en planta piloto de escorrentía industrial; fue eliminado en su mayoría con otros contaminantes en la parte superior del humedal. Las eficiencias de purificación del efluente en el humedal se correlacionaron con la distribución temporal y espacial de los índices ambientales, la actividad enzimática y las comunidades bacterianas. El 93.1% de las secuencias obtenidas del análisis DGGE se clasificaron en bacterias no cultivadas. Los filos dominantes en las comunidades bacterianas fueron proteobacterias y bacteroidetes (Yi, Jing, Wan, Ma y Wang, 2016).

Aguas residuales industriales (efluente secundario de una PTAR) de Planta Piloto con Sistema de HA acoplados de flujo vertical y horizontal se obtuvieron eficiencias de remoción de 82.3, 69.8, 77.8 y 32.3% para  $\text{NH}_4^-$ , NT, PT y DQO, respectivamente. Se observó presencia de Proteobacterias, Bacteroidetes, y Actinobacteria. Los géneros dominantes de los sistemas VF y HF fueron *Haliscomenobacter* y *Pseudomonas*. Observaron gran abundancia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes (Xu *et al.*, 2016).

Bajo condiciones de laboratorio se simuló un Humedal artificial de flujo subterráneo desconcertado y se observaron eficiencias significativas en la eliminación de especies de NT y DQO empleando astillas de madera con aireación intermitente. La aireación intermitente fue óptima para la eliminación de NT, facilitando una buena eficiencia de nitrificación mientras que no tuvo efecto negativo significativo sobre la eliminación de  $\text{NO}_3^-$ . Las eficiencias de eliminación de DQO (97%),  $\text{NH}_4^+$  (95%) y NT (94%) se obtuvieron simultáneamente con sustrato combinado de grava-escoria-astillas de madera (Li *et al.*, 2017).

En planta piloto de aguas residuales universitarias se removió  $\text{NH}_4^+$  de 76-87% en el primer año, y de 79-97% en el segundo. Sin embargo, los efluentes se consideraron altamente nitrificados. La mayor remoción de NT se observó en el sistema de humedal de flujo horizontal acoplado a una laguna de estabilización. En el segundo año se incrementó la eficiencia de remoción por mayor densidad de vegetación (Torres-Bojorges *et al.*, 2017).

En Planta Piloto de efluentes de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), se eliminó TPH en agua (84%) y arena (77%); y se aumentó la eliminación de TPH con la adición de bacterias rizosféricas. No se observaron diferencias significativas entre los parámetros evaluados (pH, OD, ORP) en cada efluente, con y sin la adición de rizobacterias (Al-Baldawi, Abdullah, Anuar y Mushrifah, 2017).

Fue eficiente la remoción de Clorotalonil en aguas residuales domésticas, materia orgánica y nutrientes. El aumento en la concentración final del plaguicida ( $385 \text{ mg L}^{-1}$ ), puede explicar la disminución en el recuento, debido a procesos de adaptación posterior al plaguicida donde se generan cambios en la dinámica, estructura y función de biopelículas (Ríos-Montes, Casas, Briones y Peñuela, 2017).

Con aguas residuales de cultivo bajo invernadero, el suplemento de las pajillas de flores como fuente de carbono hace eficiente la eliminación de nitratos. Se produjo una liberación de carbono orgánico inestable por las pajillas, lo cual bajó el rendimiento del sistema a 30 días de operación. Se produjeron amonio, nitrito y la lixiviación de N orgánico, resultando en una tasa de eliminación de NT más baja que la del  $\text{NO}_3^-$  (Chang, Ma, Chen, Lu y Wang, 2017).

En condiciones de laboratorio, se observó el aumento de la eficiencia de remoción de nitrógeno mediante la adición de biomasa vegetal. Las tasas de eliminación medias fueron de 2.64-3.24 y 2.15-2.80  $\text{g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  para nitrato y NT en comparación con 0.30 y 0.27  $\text{g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  para el control. Los valores de OD y ORP fueron favorables para la remoción de nitratos. Las actividades de las enzimas nitrato reductasa, deshidrogenasa, CM-celulasa,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa y proteasa mejoraron significativamente por la adición inicial de biomasa (Chang *et al.*, 2018).

En aguas de desechos industriales y domésticas contenían altos niveles de indicadores bacterianos. Los humedales artificiales evaluados produjeron una eliminación significativa de coliformes durante el período de estudio (66-94%) (Kaushal, Patil y Wani, 2018).

El tratamiento integrado de aguas residuales domésticas mostró un porcentaje de remoción de DQO y DBO5 ( $\approx 43\%$ ) y bacterias coliformes ( $> 45\%$ ). El sistema conservó nutrientes fertilizantes en el agua lo cual mantiene cierto potencial para el riego sostenible de cultivos. El cultivo de tomate no presentó sabores extraños y tuvo buena aprobación (Caselles Osorio *et al.*, 2018).

En Planta Piloto de aguas residuales universitarias se observó que después de un tiempo prolongado de operación (3 años), los humedales con sustrato multicapa promueven la eficiencia de eliminación de los contaminantes. Los humedales con sustrato multicapa pueden demorar la obstrucción al facilitar el desarrollo de biopelículas para la eliminación de orgánicos. Las eficiencias de remoción promedio de DQO,  $\text{NH}_4^+$ , NT y PT fueron de aproximadamente 70, 78, 62 y 80% para CW6; 58, 60, 49 y 63% para CW3; y 29, 40, 30 y 41% para CW1, respectivamente (Ding *et al.*, 2018).

En Planta Piloto de aguas residuales de Refinería de Petróleo, el sistema híbrido evaluado presentó capacidad de tratamiento del efluente utilizado. El sistema híbrido plantado con *T. latifolia* reveló valores de descarga de acuerdo con lo establecido por la OMS y el gobierno de Nigeria. El sistema HAFV con *T. latifolia* demostró mejores resultados que con otras especies evaluadas. El sistema híbrido mostró eficiencias significativas de eliminación para DBO5 (94%), DQO (88%),  $\text{NH}_4^+$  (84%),  $\text{NO}_3^-$  (89%),  $\text{PO}_4^{3-}$  (78%), SST (85%) y turbidez (97%) (Mustapha *et al.*, 2018).

En planta piloto de aguas residuales municipales, el humedal mostró un alto rendimiento en la eliminación de contaminantes del efluente considerando la aireación y las especies plantadas. La aireación junto con especies vegetales incrementó la remoción de fósforo y nitrógeno. El rango de temperatura (22.4-26.7 °C) favoreció los procesos de nitrificación y desnitrificación. El humedal plantado con *V. zizanioides* eliminó más SST (92.3%) y DBO5 (92%) que *P. karka* (SST 91.3%, DBO5 90.5%), sin embargo, las diferencias no fueron significativas. El rango de eficiencia de remoción de  $\text{NH}_4^+$  en el humedal plantado con *V. zizanioides* varió entre 55.2 y 92.7%, para *P. karka* de 64.1 a 94% y para el control 37 a 70.3%; La remoción de  $\text{NO}_3^-$  fluctuó de 51.7 a 92% para *V. zizanioides*, de 51.7 a 94.9% para *P. karka* y 34.5 a 63.6% para el control (Angassa *et al.*, 2018).

Se midieron los lixiviados de humedal plantado con *H. psittacorum* y se obtuvieron eficiencias de remoción significativas (DQO 64%; nitratos de 48%; fosfatos de 63%; plomo de 15%) en comparación con el humedal plantado con *C. haspan*. (Jiménez-Cerón *et al.*, 2018).

En planta funcional de tratamiento de aguas residuales municipales, el desempeño del humedal en la remoción de BPA, fue eficaz junto con efecto de las plantas seleccionadas. La TRH fue un factor importante en la remoción ya que el BPA mostró sensibilidad con un TRH prolongado. Uno de los antibióticos evaluados (CIP) mostró altas tasas de remoción en el humedal plantado en comparación con otro antibiótico (SMX). No se observó un aumento en la expresión de genes resistentes a antibióticos (Christofilopoulos *et al.*, 2019).

En laboratorio y agua sintética se simuló un humedal con biocarbón y mostraron mayor eficiencia de eliminación de amonio (49.7-63.5%) y nitrógeno total (81.8-86.4%), en comparación con humedales con grava pura con tasas de eliminación para amonio de 47.4% y nitrógeno total de 80.75%. El análisis de la comunidad microbiana reveló la abundancia de ciertas especies de bacterias con el aumento de biocarbón. Relación de biocarbón al 30% obtuvo mejores resultados en la eliminación de  $\text{NH}_4^+$  (63%), NT (86%) y DQO (89%) (Deng *et al.*, 2019).

Bajo condiciones de laboratorio y con aguas residuales porcinas el humedal parcialmente saturado logró una mejor eliminación de  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  y NT por flujo de marea. El humedal logró eficiencias de remoción correspondientes de 86, 61 y 57%, para DQO,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  y NT respectivamente, incluso a bajas temperaturas. Los resultados de la secuenciación indicaron que los nitrificantes (*Nitrospira* y *Rhizomicrobium*) y los desnitrificantes (*Rhodanobacter* y *Thauera*) existían simultáneamente en la capa de zeolita (Han *et al.*, 2019).

Se evaluaron lixiviados de lodos en condición de laboratorio y se observó gran potencial a temperaturas de ~29°C en el tratamiento de lixiviados. Evaluando la eficiencia a diferentes TRH, se alcanzó con un TRH de 4 días las eficiencias de remoción de DQO (85.6%),  $\text{NH}_4^+$  (99.7%), NT (85.3%) y PT (91.5%). La concentración de los metales pesados evaluados se encontró por debajo del estándar de descarga de China (Hu *et al.*, 2019).

Con agua sintética en laboratorio se observó un aumento en remoción de nitrógeno en el humedal con la adición de biocarbón a diferentes relaciones C/N del efluente. La máxima eficiencia se obtuvo a una relación C/N de 3 en la eliminación para DQO (92%),  $\text{NH}_4^+$  (50%) y NT (50%). Se presentó una nitrificación deficiente en diferentes proporciones C/N del efluente en el humedal con y sin biocarbón debido a la falta de oxígeno (Zhou *et al.*, 2019).

En vertedero funcional, la absorción de la vegetación y la adsorción de los sustratos influyeron ligeramente poco a la eliminación de compuestos hidrófilos. El consorcio microbiano degradante de los compuestos hidrófilos que incluye a *Sphingomonas* sp. y *Rhodococcus* sp. estaban bien desarrollados en medios establecidos. (Witthayaphirom *et al.*, 2020)

En agua sintética y laboratorio se midió la remoción del fenol (99%) y la DQO (93%) a temperatura ambiente. La eficiencia en la remoción del NT fue baja (7-28%). La alcalinidad en el sistema mejoró la eficiencia de remoción del tiocinato (91%). El crecimiento de la vegetación no se vio afectada por la toxicidad (Benny y Chakraborty, 2020).

En agua residual de planta de tratamiento, no se eliminó totalmente el NT del efluente mediante el uso del relleno Fe0-C. El CW-Fe fue el sistema que mejor rendimiento mostró en la eliminación de fósforo (90%). Se pudo apreciar la presencia de *Bacteroides*, *Firmicutes*, *Chlorofeli* y *Actinobacteria*. El sistema CW-Fe mostró mayor presencia de enzimas que CW-C, permitiendo la transformación de nitratos a amonio (Huang, Yang, Zhu y Yu, 2020).

En aguas residuales municipales las concentraciones de materia orgánica del suelo y NT aumentaron durante la operación a largo plazo, lo cual influyó en la composición de la comunidad microbiana. La comunidad microbiana en el humedal de manglar artificial cambió con las variaciones de la composición del sustrato (Tian *et al.*, 2020).

Aguas residuales de hospital se alcanzaron eficiencias altas de remoción de metilparabeno (Mp) (97%) y de sildenafil (Sil) en humedales plantados, en comparación con la remoción en los HA no plantados (~60%). La eliminación de carbamazepina (Cbz) fue inferior al 10%. El compuesto con mayor presencia en macrófitas fue Cbz, Sil y Mp. Se concluye que Cbz no se biodegrada. El Sil se degradó mediante la adsorción en el lecho de soporte mientras que la degradación bacteriana para el Mp (Delgado *et al.*, 2020).

En agua sintética y laboratorio se midió el  $\text{Fe}^{2+}$  a los humedales y se mostró que la eficiencia de remoción de DQO disminuía, en comparación con los que no estuvieron influenciados por  $\text{Fe}^{2+}$  con tiempos de retención similares. Por el contrario, la remoción de NT,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  se beneficiados con la adición de  $\text{Fe}^{2+}$  con diferentes concentraciones (Zhang *et al.*, 2019).

En aguas residuales concentradas domesticas segregadas el humedal híbrido mostró gran potencial en el tratamiento al reducir del orden de: DQO = 74 y 79%, y DBO5 = 70 y 93%, nutrientes NT = 45 y 49%, N amoniacal = 48 y 47%, PT = 64 y 60%, y ortofosfato = 65 y 62%; y microorganismos CT = 93.9 y 80%, y E. coli = 98.9 y 96%) (Sakurai *et al.*, 2021).

Se midió en aguas grises universitarias la dinámica de reducción y oxidación de C, S y N asociado a la población microbiana. Se identificaron grupos específicos de bacterias relacionados con la degradación del carbono orgánico. En el sistema se observaron zonas con microbiota específica primordial para la estabilidad del sistema. (Bernardes *et al.*, 2021)

Se observó la obstrucción de filtros por algunos géneros bacterianos, los cuales pueden funcionar como indicadores de la presencia temprana en los HA (Zhang *et al.*, 2021).

En lixiviados de vertedero, la eficiencia de remoción para la DQO fue de 86.3%, para  $\text{NH}_4^+$  y PT fueron de 86.7 y 88.2%, respectivamente. La tasa total de eliminación de componentes similares al ácido húmico fue de un 61.5%. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y COV con mejor tasa de remoción fueron Indeno [123-cd] pireno (85.5%), benzo [a] antraceno (82%), criseno (75.9%), triclorometano (>63.5%) y 1,2-dicloroetano (61.6%) (Yang *et al.*, 2021).

La mejor configuración de humedales para la eliminación de hormonas y eficiencia de remoción para DQO,  $\text{NH}_3^-$  y PT se alcanzó con el humedal de flujo vertical acoplado con un humedal de flujo horizontal, ambos con aireación asistida. Los esteroides fueron degradados por bacterias aeróbicas (Chen *et al.*, 2021).

En Planta piloto de tratamiento de aguas residuales de industria de curtiduría de pieles se encontró la piedra pómez brindó una mayor superficie para la vegetación y mejoró la remoción de contaminantes con un TRH de 5 días para DBO5, DQO y SST ( $58.67 \pm 6.5$ ,  $214.67 \pm 32.33$  y  $80 \pm 4.58$ , respectivamente). Así mismo el  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , NT,  $\text{PO}_4^-$  y PT ( $4.67 \pm 1.53$ ,  $0.37 \pm 0.15$ ,  $6.50 \pm 1.32$ ,  $2.67 \pm 1.26$  y  $5.53 \pm 0.5$ , respectivamente) (Aregu *et al.*, 2021).

En planta piloto de aguas residuales de granja porcina, se evaluaron nueve humedales con dos tipos diferentes de vegetación y con diferentes tasas de carga de nitrógeno. A menor carga adicionada, mayor eficiencia de remoción (44.9%). La alta concentración de  $\text{NH}_3^-$  provocó un efecto inhibitorio en el crecimiento de una de especie y en su capacidad de remoción de contaminantes (Fia *et al.*, 2021).

En planta piloto y aguas residuales sintéticas el tratamiento con álcali destruyó enlaces entre la lignocelulosa y otros componentes. Mejoró las tasas de eliminación de NT,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  en un 24.41%, 31.8% y 8.8%, respectivamente. Se concluye que ALH-C mejora la remoción de nitrógeno significativamente durante las temporadas de bajas temperaturas (Zheng *et al.*, 2021).

En agua continental, la vegetación emergente cambió significativamente la composición de las comunidades microbianas y los genes metabólicos, promoviendo la actividad metabólica y diversidad de las comunidades microbianas (Fang *et al.*, 2021).

En aguas residuales domesticas se midió en humedales de construcción profunda permiten una mejor eliminación de nutrientes debido a la presencia de las comunidades bacterianas. Diversidad en la presencia de bacterias fueron identificadas en humedales debido a diferentes concentraciones de antibióticos en las aguas residuales (Rampuria *et al.*, 2021).

Con aguas grises y Biorreactor de membrana (BRM), se evaluó en Humedal artificial de flujo vertical integrado (HAFVI). Resultados mostraron positivos indicadores en el tratamiento de aguas grises. BRM tuvo mejores eficiencias de remoción que el humedal (DQO de  $20 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_3^-$  de  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$ ). La ruta de eliminación de los PCP en el MBR se efectuó por medio de adsorción y biodegradación de lodos activados, pero variando por el tipo de sustrato (Ren *et al.*, 2021).

---

---

## CONCLUSIONES

Los humedales artificiales (HA) son opción viable para el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes. Su funcionamiento se basa en la acción de comunidades microbianas y su interacción con la vegetación presente en su entorno. Diferentes tipos de vegetación en los humedales se relaciona con diferentes eficiencias en la remoción de contaminantes. Eliminar eficientemente el nitrógeno, el fósforo o el azufre; contribuye a prevenir problemas como la eutrofización y la degradación del agua en cuerpos receptores. Es esencial realizar una selección cuidadosa del sustrato, considerar los factores ambientales relevantes y monitorear los parámetros clave. La tecnología de manejo de los humedales artificiales (HA) han sido probados y aplicados en sistemas a escala de laboratorio o en pruebas piloto. No obstante, es imperante la necesidad de abordar con mayor profundidad y exhaustividad el proceso de escalamiento de estas tecnologías a problemas reales en ecosistemas afectados por las actividades antropogénicas.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

No aplicable.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, curación de datos, análisis formal de los datos, metodología, validación, visualización, redacción: J.N.R. Conceptualización, validación de la investigación, metodología, redacción: M.R.C.C. Metodología, validación, y redacción: F.L.R. Validación, visualización: C.R.V.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado como parte del apoyo financiado mediante el programa de posgrados de calidad del CONACYT a través del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental en el TECNM Instituto Tecnológico de Boca del Río.

## LITERATURA CITADA

- Al-Baldawi, I. A., Abdullah, S. R. S., Anuar, N., & Mushrifah, I. (2017). Bioaugmentation for the enhancement of hydrocarbon phytoremediation by rhizobacteria consortium in pilot horizontal subsurface flow constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 75-84. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1120-2>
- Angassa, K., Leta, S., Mulat, W., Kloos, H., & Meers, E. (2018). Organic Matter and Nutrient Removal Performance of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Planted with Phragmites karka and Vetiveria zizanioides for Treating Municipal Wastewater. *Environmental Processes*, 5, 115-130. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0276-1>
- Araque-Niño, I. D., Britto-Aponte, M. C., Cuellar-Rodríguez, L. A., & Perico-Granados, N. R. (2018). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista de Tecnología*, 17(1), 37-48. <https://doi.org/10.18270/rt.v17i1.2950>

- Archer, E., Petrie, B., Kasprzyk-Hordern, B., & Wolfaardt, G. M. (2017). The fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), endocrine disrupting contaminants (EDCs), metabolites and illicit drugs in a WWTW and environmental waters. *Chemosphere*, 174, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.101>
- Aregu, M. B., Asfaw, S. L., & Khan, M. M. (2021). Developing horizontal subsurface flow constructed wetland using pumice and *Chrysopogon zizanioides* for tannery wastewater treatment. *Environmental Systems Research*, 10, 1-13 <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00238-0>
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Del Valle-Paniagua, D. H., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 319-342. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Baptestini, G. C. F., Matos, A. T., & Borges, A. C. (2016). Efeito da inversão no sentido do escoamento nas características hidrodinâmicas e nas plantas cultivadas em sistemas alagados construídos. *Acta Scientiarum - Technology*, 38(1), 49-56. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.27864>
- Benny, C., & Chakraborty, S. (2020). Continuous removals of phenol, organics, thiocyanate and nitrogen in horizontal subsurface flow constructed wetland. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101099>
- Bernardes, F. S., de Souza-Pereira, M. A., Hassan, I. A. I., de Castro, A. P., Roche, K. F., & Paulo, P. L. (2021). Change in microbial profile and environmental conditions in a constructed wetland system treating greywater. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 34539-34552. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12822-z>
- Carballeira, T., Ruiz, I., & Soto, M. (2017). Aerobic and anaerobic biodegradability of accumulated solids in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.048>
- Caselles-Osorio, A., Mendoza, G., Simanca-Ospino, M., Romero-Borja, I. M., Mosquera-Ruiz, J. E., & Eslava-Eljash, P. (2018). Tomato (*Lycopersicon esculentum*) production in sub surface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment in rural a Colombian community. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19(4), 1-10. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2018.19n4.038>
- Chand, N., Suthar, S., & Kumar, K. (2021). Wastewater nutrients and coliforms removals in tidal flow constructed wetland: Effect of the plant (*Typha*) stand and biochar addition. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102292. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102292>
- Chang, J., Deng, S., Jia, W., Chen, P., Wang, Y., & Chen, J. (2018). Nitrogen removal performance and enzyme activities of baffled subsurface-flow constructed wetlands with macrophyte biomass addition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3837-7>
- Chang, J., Ma, L., Chen, J., Lu, Y., & Wang, X. (2017). Greenhouse wastewater treatment by baffled subsurface-flow constructed wetlands supplemented with flower straws as carbon source in different modes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 1578-1587. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7922-4>
- Chen, J., Liu, S. S., Wang, Y. J., Li, J., Liu, Y. S., Yang, F., & Ying, G. G. (2021). Optimized constructed wetlands enhance the removal and reduce the risks of steroid hormones in domestic wastewater. *Science of the Total Environment*, 757, 143773. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143773>
- Christofilopoulos, S., Kaliakatsos, A., Triantafyllou, K., Gounaki, I., Venieri, D., & Kalogerakis, N. (2019). Evaluation of a constructed wetland for wastewater treatment: Addressing emerging organic contaminants and antibiotic resistant bacteria. *New Biotechnology*, 52, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.05.006>
- Delgado, N., Bermeo, L., Hoyos, D. A., Peñuela, G. A., Capparelli, A., Marino, D., ... & Casas-Zapata, J. C. (2020). Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands. *Water Research*, 187, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116448>
- Deng, C., Huang, L., Liang, Y., Xiang, H., Jiang, J., Wang, Q., ... & Chen, Y. (2019). Response of microbes to biochar strengthen nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands: Microbial community structure and metabolite characteristics. *Science of the Total Environment*, 694, 133687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133687>
- Ding, Y., Lyu, T., Bai, S., Li, Z., Ding, H., You, S., & Xie, Q. (2018). Effect of multilayer substrate configuration in horizontal subsurface flow constructed wetlands: assessment of treatment performance, biofilm development, and solids accumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1883-1891. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0636-4>
- Ebrahimbabaie, P., & Pichtel, J. (2021). Biotechnology and nanotechnology for remediation of chlorinated volatile organic compounds: current perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 7710-7741. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11598-y>
- Fan, J., Zhang, J., Guo, W., Liang, S., & Wu, H. (2016). Enhanced long-term organics and nitrogen removal and associated microbial community in intermittently aerated subsurface flow constructed wetlands. *Bioresour Technol*, 214, 871-875. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.083>
- Fang, J., Dong, J., Li, C., Chen, H., Wang, L., Lyu, T., ... & Liu, J. (2021). Response of microbial community composition and function to emergent plant rhizosphere of a constructed wetland in northern China. *Applied Soil Ecology*, 168, 104141. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104141>
- Fia, F. R. L., de Matos, A. T., Fia, R., de Matos, M. P., Borges, A. C., & Baptestini, G. C. F. (2021). Kinetics and Removal Efficiency of Nitrogen in Constructed Wetlands Cultivated with Different Plant Species for Treating Swine Wastewater Applied at Different Rates. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04972-6>
- Han, Z., Miao, Y., Dong, J., Shen, Z., Zhou, Y., Liu, S., & Yang, C. (2019). Enhanced nitrogen removal and microbial analysis in partially saturated constructed wetland for treating anaerobically digested swine wastewater. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 13(4), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1133-4>
- Hu, S., Chen, Z., Lv, Z., Chen, K., Huang, L., Zuo, X., ... & Chen, Y. (2019). Purification of leachate from sludge treatment beds by subsurface flow constructed wetlands: effects of plants and hydraulic retention time. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 5769-5781. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4006-7>
- Huang, X., Yang, X., Zhu, J., & Yu, J. (2020). Microbial interspecific interaction and nitrogen metabolism pathway for the treatment of municipal wastewater by iron carbon based constructed wetland. *Bioresour Technol*, 315, 123814. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123814>
- Ilyas, H., & van Hullebusch, E. D. (2020). Performance comparison of different constructed wetlands designs for the removal of personal care products. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 1-29. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093091>
- Jiménez-Cerón, Y. F., Delgado-Calvache, L. I., Fernández-Tulande, C., Pino-Alegría, H. M., Casas-Zapata, J. C., Madera-Parra, C. A., ... & Rengifo-Canzales, E. (2018). Tratamiento de lixiviados utilizando humedales construídos y determinación de conductividades hidráulicas en clima tropical. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 543-552. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.979>
- Kaushal, M., Patil, M. D., & Wani, S. P. (2018). Potency of constructed wetlands for deportation of pathogens index from rural, urban and industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15, 637-648. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1423-y>

- Kirui, W. K., Wu, S., Kizito, S., Carvalho, P. N., & Dong, R. (2016). Pathways of nitrobenzene degradation in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Effect of intermittent aeration and glucose addition. *Journal of Environmental Management*, *166*, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.001>
- Kirui, W. K., Wu, S., Lei, M., & Dong, R. (2015). Nitrobenzene degradation pathways and their interaction with sulfur and nitrogen transformations in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, *84*, 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.021>
- Li, H., Chi, Z., Yan, B., Cheng, L., & Li, J. (2017). Nitrogen removal in wood chip combined substrate baffled subsurface-flow constructed wetlands: impact of matrix arrangement and intermittent aeration. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 5032-5038. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8227-3>
- Li, Y., Wu, B., Zhu, G., Liu, Y., Ng, W. J., Appan, A., & Tan, S. K. (2016). High-throughput pyrosequencing analysis of bacteria relevant to cometabolic and metabolic degradation of ibuprofen in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, *562*, 604-613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.020>
- López, D., Fuenzalida, D., Vera, I., Rojas, K., & Vidal, G. (2015). Relationship between the removal of organic matter and the production of methane in subsurface flow constructed wetlands designed for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, *83*, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.037>
- Madera-Parra, C. A. (2016). Treatment of landfill leachate by polyculture constructed wetlands planted with native plants. *Ingeniería y Competitividad*, *18*(2), 183-191.
- Mustapha, H. I., van Bruggen, J. J. A., & Lens, P. N. L. (2018). Optimization of petroleum refinery wastewater treatment by vertical flow constructed wetlands under tropical conditions: Plant Species selection and polishing by a horizontal flow constructed wetland. *Water, Air, and Soil Pollution*, *229*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3776-3>
- Papaevangelou, V., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2016). Effect of operational and design parameters on performance of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating university campus wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 19504-19519. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7162-7>
- Rabello, V. M., Teixeira, L. C. R. S., Gonçalves, A. P. V., & de Sá Salomão, A. L. (2019). The efficiency of constructed wetlands and algae tanks for the removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a Systematic Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, *230*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4304-9>
- Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Lim, J. E., Ahmed, M. B. M., Zhang, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Invasive plant-derived biochar inhibits sulfamethazine uptake by lettuce in soil. *Chemosphere*, *111*, 500-504. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.040>
- Rampuria, A., Gupta, A. B., Kulshreshtha, N. M., & Brighu, U. (2021). Microbiological Analysis of Two Deep Constructed Wetlands with Special Emphasis on the Removal of Pathogens and Antibiotic-Resistant Bacteria. *Water, Air, and Soil Pollution*, *232*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05121-3>
- Ren, X., Zhang, M., Wang, H., Dai, X., & Chen, H. (2021). Removal of personal care products in greywater using membrane bioreactor and constructed wetland methods. *Science of the Total Environment*, *797*, 148773. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148773>
- Ríos-Montes, K. A., Casas-Zapata, J. C., Briones-Gallardo, R., & Peñuela, G. (2017). Optimal conditions for chlorothalonil and dissolved organic carbon in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, *52*(4), 274-281. <https://doi.org/10.1080/03601234.2016.1273005>
- 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>
- Sakurai, K. S. I., Pompei, C. M. E., Tomita, I. N., Santos-Neto, Á. J., & Silva, G. H. R. (2021). Hybrid constructed wetlands as post-treatment of blackwater: An assessment of the removal of antibiotics. *Journal of Environmental Management*, *278*, 111552. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111552>
- Sánchez, O. (2017). Constructed Wetlands Revisited: Microbial Diversity in the -omics Era. *Microbial Ecology*, *73*, 722-733. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0881-y>
- Semenov, M. V., Krasnov, G. S., Rybka, K. Y., Kharitonov, S. L., Zavgorodnyaya, Y. A., Yudina, A. V., & Shchegolkova, N. M. (2020). Spatial changes in microbial communities along different functional zones of a free-water surface wetland. *Microorganisms*, *8*(10), 1-23. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101604>
- Sierra-Pech, O. M., & López-Ocaña, G. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab' Revista de Divulgación Académica de Ciencias Biológicas*, *19*(36), 47-55. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a19n36.337>
- Solís-Silvan, R., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., Hernández-Barajas, J. R., & Romellón-Cerino, M. J. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, *41*(1), 40-47.
- Tian, T., Yang, Q., Wei, G., Cheung, S. G., Shin, P. K. S., ... & Tam, N. F. Y. (2020). Changes of substrate microbial biomass and community composition in a constructed mangrove wetland for municipal wastewater treatment during 10-years operation. *Marine Pollution Bulletin*, *155*, 111095. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111095>
- Torres-Bojorges, Á. X., Hernández-Razo, N. A., Fausto-Urquieta, A. A., & Zurita-Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *33*(1), 37-47. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.03>
- Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. (2021). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of the Total Environment*, *755*, 142540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142540>
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, *2*(3), 530-549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Wang, H., Zhong, H., & Bo, G. (2018). Existing forms and changes of nitrogen inside of horizontal subsurface constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 771-781. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0477-1>
- Wang, P., Zhang, H., Zuo, J., Zhao, D., Zou, X., Zhu, Z., ... & an, S. (2016). A Hardy Plant Facilitates Nitrogen Removal via Microbial Communities in Subsurface Flow Constructed Wetlands in Winter. *Scientific Reports*, *6*, 1-11. <https://doi.org/10.1038/srep33600>
- Witthayaphrom, C., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Ogata, Y., Ebie, Y., & Ishigaki, T. (2020). Organic micro-pollutant removals from landfill leachate in horizontal subsurface flow constructed wetland operated in the tropical climate. *Journal of Water Process Engineering*, *38*, 101581. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101581>

- Wu, H., Fan, J., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 14637-14650. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5151-x>
- Xu, M., Liu, W., Li, C., Xiao, C., Ding, L., Xu, K., ... & Ren, H. (2016). Evaluation of the treatment performance and microbial communities of a combined constructed wetland used to treat industrial park wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 10990-11001. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6181-8>
- Yang, C., Fu, T., Wang, H., Chen, R., Wang, B., He, T., ... & Chen, M. (2021). Removal of organic pollutants by effluent recirculation constructed wetlands system treating landfill leachate. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 101843. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101843>
- Yi, X. H., Jing, D. D., Wan, J., Ma, Y., & Wang, Y. (2016). Temporal and spatial variations of contaminant removal, enzyme activities, and microbial community structure in a pilot horizontal subsurface flow constructed wetland purifying industrial runoff. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 8565-8576. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6083-9>
- Zhang, M., Xu, D., Bai, G., Cao, T., Liu, W., Hu, Z., ... & Wu, Z. (2021). Changes of microbial community structure during the initial stage of biological clogging in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 337, 125405. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125405>
- Zhang, Y., Liu, X., Fu, C., Li, X., Yan, B., & Shi, T. (2019). Effect of Fe<sup>2+</sup> addition on chemical oxygen demand and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemosphere*, 220, 259-265. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.144>
- Zhao, Z., Xu, C., Zhang, X., & Song, X. (2019). Addition of iron materials for improving the removal efficiencies of multiple contaminants from wastewater with a low C/N ratio in constructed wetlands at low temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11988-11997. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04648-7>
- Zheng, Y., Cao, T., Zhang, Y., Xiong, J., Dzakpasu, M., Yang, D., ... & Wang, X. (2021). Characterization of dissolved organic matter and carbon release from wetland plants for enhanced nitrogen removal in constructed wetlands for low C-N wastewater treatment. *Chemosphere*, 273, 129630. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129630>
- Zhou, X., Wu, S., Wang, R., & Wu, H. (2019). Nitrogen removal in response to the varying C/N ratios in subsurface flow constructed wetland microcosms with biochar addition. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 3382-3391. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3871-4>