



Avances en la remoción de microcontaminantes orgánicos con humedales de tratamiento: Una mini-revisión

Advances on the removal of emerging organic micropollutants with treatment wetlands: A mini-review

María del Carmen Durán-Domínguez¹, Carolina Leyva-Inzunza², Amado Enrique Navarro-Frómata^{3*}

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

²Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

³Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Izúcar de Matamoros, Puebla, México

*Corresponding author, E-mail: navarro4899@gmail.com

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido: Enero 15, 2024 / *Received: January 15, 2024*

Aceptado: Febrero 15, 2024 / *Accepted: February 15, 2024*

Resumen

Los contaminantes emergentes siguen estando en el centro de la atención de las investigaciones que se relacionan con la contaminación ambiental. Inicialmente los estudios de estos contaminantes se dirigían fundamentalmente a la evaluación de su presencia y efectos en los ecosistemas. Hoy en día se dedica mayor atención a su remoción, en específico de las aguas naturales y residuales. Considerando que en los sistemas de tratamiento convencionales no son removidos con la eficacia necesaria, en la actualidad se presta una atención creciente a los sistemas basados en la naturaleza y, dentro de ellos, a los humedales de tratamiento (HT), también denominados artificiales o construidos, que han demostrado ser eficaces para ello. En la presente investigación se revisan estudios recientes dirigidos a lograr mayores porcentajes de remoción de los contaminantes emergentes y, en particular, de los más refractarios a los procesos de descontaminación. Esto se logra fundamentalmente por dos vías: La intensificación de los procesos en los humedales de tratamiento o por la combinación de estos sistemas con otras tecnologías. Se muestran ejemplos de la primera vía mediante la aireación de los sistemas y el uso de materiales específicos en los medios de soporte, entre otros. Con referencia a la segunda, se menciona su combinación con celdas de combustible microbianas, biorreactores, procesos de fotólisis, entre otras tecnologías.

Palabras clave: Humedales de tratamiento, contaminantes emergentes, remoción

Abstract

Emerging pollutants continue to be at the center of attention of research related to environmental pollution. Initially, studies of these contaminants were fundamentally aimed at evaluating their presence and effects on ecosystems. Today, greater attention is devoted to their removal, specifically from natural and wastewater. Considering that in conventional treatment systems they are not removed with the necessary efficiency, increasing attention is currently paid to nature-based systems and, within them, to treatment wetlands (HT), also called artificial or constructed, which have proven to be effective for it. This research reviews recent studies aimed at achieving higher percentages of removal of emerging contaminants and, in particular, those most refractory to decontamination processes. This is achieved fundamentally in two ways: The intensification of the processes in the treatment wetlands or by the combination of these systems with other technologies. Examples of the first route are shown through the aeration of the systems and the use of specific materials in the support means, among others. With reference to the second, its combination with microbial fuel cells, bioreactors, photolysis processes, among other technologies, is mentioned.

Keywords: Treatment wetlands, emerging contaminants, removal

Introducción

Para satisfacer las crecientes necesidades de la humanidad, se ha incrementado la producción y utilización de muchos productos y bienes de consumo que contienen una diversidad de sustancias químicas que, durante su uso y disposición final, ingresan al ambiente. Algunas de ellas son

introducidas o detectadas recientemente. Otras se añaden a la lista de disruptores endocrinos o tienen efectos tóxicos. Muchas de ellas pueden clasificarse como persistentes o pseudo-persistentes. Finalmente, la mayoría no se consideran en las regulaciones ambientales a pesar de varias de ellas no se eliminan eficientemente en los sistemas de tratamiento convencionales.

Todo ello ha motivado su clasificación como contaminantes emergentes (CE) o contaminantes de preocupación emergente. También se consideran dentro de estos contaminantes los microplásticos, diferentes microorganismos y componentes de los desechos electrónicos y baterías como los monómeros de cristal líquido, nanomateriales de carbono y de metales o sus óxidos (Abdelkareem et al., 2023; Feng et al., 2023; García-Muñoz et al., 2023; Tao et al., 2022; Yu et al., 2024).

Entre los CE se destacan los microcontaminantes orgánicos (MCO), así denominados por ser compuestos orgánicos y encontrarse en los ecosistemas acuáticos a niveles de ppb y ppt, aunque se encuentran prácticamente en todos los compartimentos ambientales (Manetti y Tomei, 2024; Navarro-Frómeta, 2023; Włodarczyk-Makuła, 2024; Yusuf et al., 2024).

Los fármacos, productos del cuidado personal, PCP (fragancias, cosméticos, protectores solares, etc.), aditivos de alimentos, detergentes, desinfectantes, entre otros, pese a las bajas concentraciones en que se encuentran, son perjudiciales para la salud humana, la de la biota y, en general, la de los ecosistemas (Chen et al., 2024; Impellitteri et al., 2023; Larrea-Murrell et al., 2023).

Los sistemas convencionales de tratamiento no fueron diseñados para lidiar con toda la diversidad de moléculas de los MCO. Algunos de estos MCO muestran estabilidad en las distintas secciones de los sistemas de tratamiento por lo que no se remueven. Hay algunas excepciones que dependen del compuesto específico y del formato del tratamiento convencional, pero algunos de ellos no se remueven con suficiente efectividad de las aguas residuales (Adeel et al., 2024; Dubey et al., 2023; Imwene et al., 2022; Kumar et al., 2023; Wen et al., 2024).

Por ello se recurre a distintas opciones tecnológicas como la adsorción, la coagulación y la electrocoagulación, la filtración basada en membranas y los procesos de oxidación avanzada, entre otros. También hay combinaciones de estos y otros procesos. Desafortunadamente, en ocasiones, tienen costos altos o complejidades operacionales que los hacen poco asequibles para el tratamiento de aguas residuales de pequeños objetivos socio-económicos (Clímaco-Cunha et al., 2024; Goyat et al., 2024; Gupta et al., 2024; Jena et al., 2023; Kumar et al., 2023; Lin et al., 2023; Rangappa et al., 2024; Sandoval et al., 2024; Werkneh et al., 2022).

En los procesos biológicos, tanto en condiciones aerobias como anaerobias, la biodegradación y la biosorción están entre los principales mecanismos de remoción de los MCO. En estos procesos, la acción de los organismos vivos y las enzimas, que degradan los compuestos orgánicos incluyendo los refractarios como los colorantes textiles y reducen los riesgos ecotoxicológicos de los efluentes de los tratamientos, se sustentan en sus interacciones.

Por ello, los procesos como la biorremediación, la biofiltración y la fitoremediación, en los que se utilizan bacterias, hongos, microalgas y plantas acuáticas entre otros organismos vivos, son una elección para la remoción de los MCO. Naturalmente, su efectividad para remover los MCO depende también de las características de los compuestos a tratar y las especificidades de la interacción entre los componentes biológicos (Ajaz et al., 2024; Kumar et al., 2024; López-Serna et al., 2024; Manetti y Tomei, 2024; Mehariya et al., 2024; Poddar et al., 2024).

Entre los sistemas que se consideran adecuados para la remoción de los MCO, se encuentran los humedales de tratamiento (HT), también denominados artificiales o construidos que han sido utilizados desde hace décadas (Vymazal, 2024), aspecto al que se dedica la presente mini-revisión.

Las soluciones basadas en la naturaleza: Los humedales de tratamiento

Lo expuesto respecto a los procesos biológicos, es el fundamento de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), que atraen la atención de la academia, los actores de gobierno y la sociedad. Las SBN son enfoques integrales que tienen como objetivo mitigar el cambio climático, reducir la contaminación y estimular la biodiversidad. En la literatura se relacionan con los objetivos del desarrollo sustentable o sostenible: "Concretamente, constituyen infraestructuras verdes y azules que se inspiran de un buen conocimiento de la ecología de las especies y sus interacciones con el entorno para minimizar riesgos ambientales y contribuir a la sostenibilidad de las actividades humanas en un contexto de antropización y cambio climático. Se trata de un mercado importante de la realidad ambiental actual, además de un requisito indispensable de acuerdo con normativas europeas e internacionales en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible marcados por la Agenda 2030" (Instituto Superior del Medio Ambiente, 2022).

Y, con respecto al agua, es imprescindible referir la publicación de los conceptos básicos en 2018 por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas con las soluciones basadas en la naturaleza, SBN (UN WWAP, 2018).

Las SBN pueden adoptar diferentes formas y diseños: Franjas amortiguadoras, paredes y techos verdes, tratamientos con base en microalgas, zanjas de drenaje con vegetación, la recarga inducida por infiltración en las riberas de los ríos y, siendo de particular interés para el tratamiento de aguas residuales, los HT (Abd-ur-Rehman et al., 2023; Brown et al., 2023; Carvalho y Matamoros, 2022; Matos y Roebeling, 2022; Rizzo et al., 2023; Stefanatou et al., 2024).

Las SBN son efectivas para la reducción de los contaminantes primarios y también pueden remover a los CE (Bodus et al., 2023; Hu et al., 2023; Kondor, 2024). Los diseños clásicos de humedales de tratamiento se muestran en la Figura 1 (David et al., 2023).

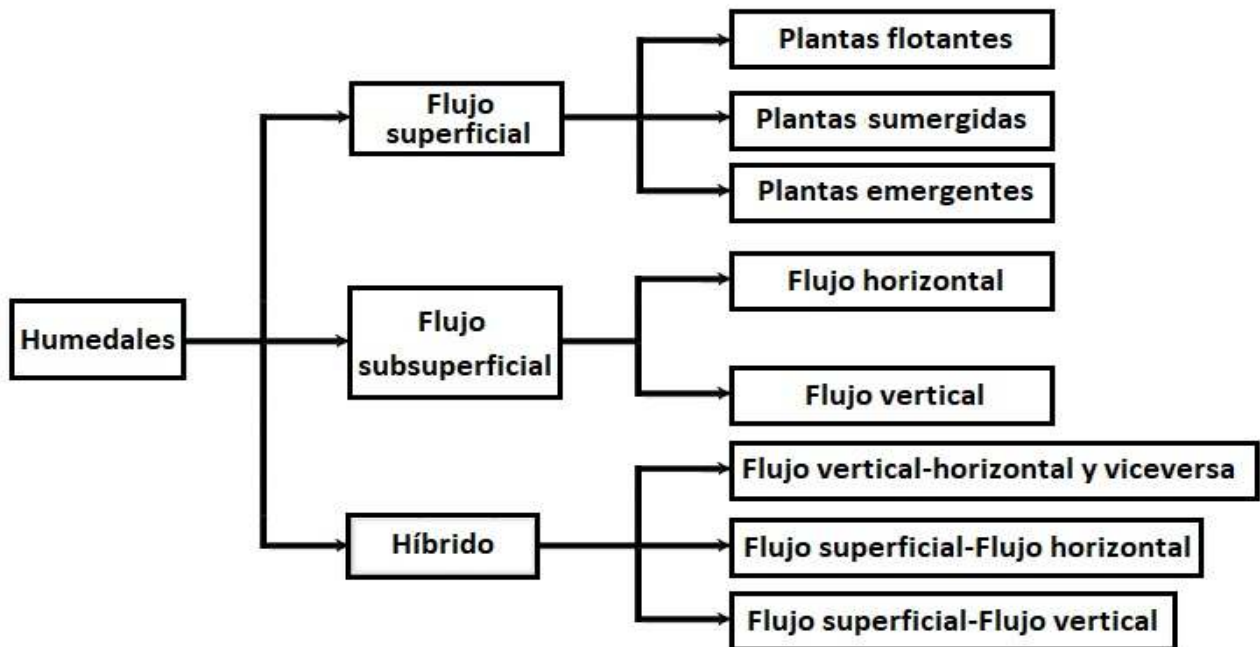


Figura 1. Diseños clásicos de humedales de tratamiento

Los HT utilizan los procesos naturales en los que intervienen los microorganismos, plantas y medios de soporte que los componen así como la energía disponible en la naturaleza. Son reconocidos como una SBN de alta efectividad en el tratamiento de aguas residuales domésticas y algunas aguas industriales recalcitrantes, escorrentías urbanas y agrícolas. En todas ellas muestran efectividad en la remoción de los contaminantes primarios. Tienen, además, bajos costos de mantenimiento. Por otro lado, son energéticamente eficientes y tienen la capacidad de integrarse con el paisaje. También mejoran los ecosistemas, ofreciendo posibilidades de aprovechamiento de la biomasa de su vegetación. Todas estas ventajas y muchas otras los hacen atractivos para pequeños objetivos socioeconómicos (Akyürek y Ağdağ, 2024; Beisso y Navarro-Frómata, 2022; Mohsin et al., 2023; Shah, 2023; Sharma et al., 2024).

Para la operación de los HT en zonas rurales, un suministro de energía utilizando fuentes renovables de energía como las celdas solares puede incrementar su fiabilidad en la operación (Yang et al., 2024). Estos sistemas han demostrado ser robustos dando buenos resultados a gran escala y durante muchos años (Gonzalez-Flo et al., 2022; Martel-Rodríguez et al., 2022; Nan et al., 2023). No están exentos de problemas como por ejemplo la emisión de gases de efectos de invernadero. También destaca el área de terreno necesaria para su construcción. Otro problema es el de la colmatación del medio granular. Las dificultades para tratar aguas residuales con una baja relación C/N es una debilidad. Otro problema más es su gestión inadecuada, así como los efectos negativos a largo plazo en el agua subterránea si se daña la membrana aislante. Y, en el caso de México y otros países de Latinoamérica, la necesidad de escalar su implementación más allá de los sistemas piloto (Bazúa-Rueda et al., 2019; Li et al., 2024; Liu et al., 2024a; Marín-Muñiz et al., 2023; Navarro-Frómata y Durán-Domínguez, 2019; Patro et al., 2024; Wei et al., 2024; Xiang et al., 2024; Xiong et al., 2023).

Las investigaciones del desempeño de los HT se centran en la evaluación comparativa de los distintos formatos de ejecución de la tecnología (de flujo superficial, HTFS, horizontales, HTFSSH, verticales, HTFSSV, integrados de flujo vertical, HIFV, híbridos, HTH, de plantas flotantes, HTPF, ver Glosario), el papel de los distintos componentes del sistema incluyendo sistemas de pretratamiento que disminuyan los riesgos de colmatación, los mecanismos de remoción, el tratamiento de aguas residuales refractarias, el incremento de la remoción de la contaminación mediante: El cotratamiento de efluentes de distintos procesos, el manejo de la hidráulica de los sistemas, el uso de adsorbentes dentro del medio soporte, la bioaumentación, la combinación con otras tecnologías y SBN, entre otras (Brunhoferova et al., 2024; Guerrero-Brotos et al., 2024; Liu et al., 2024b; Mancuso et al., 2024; Mao et al., 2023; Masharqa et al., 2023; Pinedo-Hernández et al., 2024; Plaimart et al., 2024; Qi et al., 2023; Shah, 2023; Singh et al., 2024; Xu et al., 2023; Zhang et al., 2024b).

Siendo la biodegradación uno de los principales mecanismos de remoción de la contaminación en los HT, uno de los focos de atención en los estudios de estos sistemas, sigue siendo la diversidad y estructura de las comunidades de microorganismos presentes, tanto en la rizosfera como en la filosfera (Deng et al., 2024). Hay evidencias de que la adaptación de las macrofitas en los HT se ve modulada por las comunidades bacterianas presentes y con una acción de la planta favorable a las comunidades que favorecen su desarrollo lo que puede mejorar la remoción de contaminantes y la resiliencia ante el cambio climático (Msaki et al., 2023; Wang et al., 2022; Wang et al., 2023). Una revisión reciente del estado del arte permite apreciar la efectividad de los HT en la disminución de los indicadores clásicos de la contaminación (David et al., 2023).

Remoción de los microcontaminantes orgánicos, MCO, en los humedales de tratamiento

En los HT, por su flexibilidad y adaptabilidad a distintos requerimientos regionales y locales, se logran remover, tanto los contaminantes primarios como los MCO, con eficiencias similares o superiores en comparación, por ejemplo, con los sistemas de tratamiento clásico, presentando en sus efluentes una menor toxicidad y riesgo biológico. Esto implica la selección adecuada de los componentes del sistema

y, por lo general, involucran una adaptación fundamentalmente de la microbiota presente en ellos al agua que se va a tratar (de-Campos y Soto, 2024; Ma et al., 2022; Pinedo-Hernández et al., 2024; Sánchez et al., 2022; Wagner et al., 2023)

La remoción de los MCO en los HT no es un proceso determinístico que dé siempre los resultados esperados. En estos sistemas ocurren procesos físicos, químicos y microbiológicos, a través de la intervención tanto el medio soporte como de las plantas y de las comunidades de microorganismos presentes en el sistema. Por otro lado, influyen también las condiciones, diseño y operación del sistema, como por ejemplo, la carga hidráulica. Lo anterior explica la diversidad de resultados experimentales y la atención a los distintos factores que intervienen en el proceso de remoción y la efectividad de los sistemas híbridos y de varias etapas especialmente para compuestos farmacéuticos y hospitalarios (Al-Mashaqbeh et al., 2023; Cifuentes et al., 2023; Karki y Philip, 2024; Muntaj et al., 2024).

Aunque controvertido durante algunos años, el rol positivo de las plantas en los HT ha sido demostrado en distintos tipos de experimentos. Las plantas contribuyen a través de distintos procesos de fitodegradación y translocación, así como por la bioacumulación de los MCO (Drzymała et al., 2022; Felis et al., 2024; Jing et al., 2022; Patro et al., 2024; Shi et al., 2023; Zapata-Morales et al., 2023).

El aprovechamiento de la masa de la vegetación, siendo un producto secundario del funcionamiento de los HT, es necesaria. Por ello es importante mencionar el desarrollo de estudios que demuestran su utilidad para remover algunos MCO como, por ejemplo, los antibióticos (Fu et al., 2024).

En la Tabla 1 se refieren algunos trabajos interesantes, utilizando HT de diseño clásico, publicados entre 2022 y 2024. Es importante mencionar que, aunque no todos son sobre MCO, se presta atención creciente a la remoción de bacterias y genes resistentes a los antibióticos (BRA y GRA, respectivamente). Un efecto importante de la remoción de los MCO en los HT es la disminución de la toxicidad de los efluentes. A este aspecto se le está confiriendo la importancia que merece y está siendo evaluado en muchos países. En el caso de México está incluido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 por su carácter integrador que indica la presencia de sustancias reguladas o no que pueden afectar la salud humana o el ambiente (DOF, 2024; Gao et al., 2024).

Tabla 1. Algunas referencias de trabajos recientes sobre la remoción de MCO en HT de diseño convencional

Tipo de HT, nivel	MCO estudiados y objetivos de la investigación	Referencia
HTFS, gran escala	Plaguicidas en la escorrentía agrícola, cinética de su remoción	Buscaroli et al. (2024)
HFSSH, mesocosmo	Fármacos: Diclofenaco, naproxeno. Papel de la macrófita en la remoción. Modelación del proceso	Zapata-Morales et al. (2023)
HTH, mesocosmo	Carbamazepina, influencia de la temperatura de operación del sistema	Shi et al. (2023)
HTFSSV flujo ascendente, laboratorio	Remoción de sulfadiazina y sus subproductos clorados	Wang et al. (2024)
HT de distinta configuración, gran escala	Remoción de antibióticos y genes resistentes a los antibióticos. Los HTH removieron mejor los GRA, pero no completamente	Felis et al. (2024)
HTFSSH, mesocosmo	Remoción de fármacos: Paracetamol, ibuprofeno, carbamazepina, lorazepam, ciprofloxacina, sulfametoxazol y fluvastatina. Influencia de la estación (pre-monzón, monzón y pos-monzón)	Alsubih et al. (2022)

MCO: Microcontaminantes orgánicos; HT: Humedales de tratamiento; HTFS: Humedales de tratamiento de flujo superficial; HFSSH: Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial horizontal; HTH: Humedales de tratamiento híbridos; HTFSSV: Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial vertical; GRA: Genes resistentes a los antibióticos

Debido a que la remoción de los MCO en los HT es el resultado de una combinación de transformaciones físicas, químicas y microbiológicas a través de los procesos de fotodegradación, biodegradación, fitoremediación y sorción, los mecanismos y modelación de remoción de los MCO en los HT son uno de los aspectos a los que se le presta atención por su complejidad. En ellos influyen, además de los elementos del sistema y las condiciones de operación, las características fisicoquímicas de los MCO. Dentro de ellas destacan sus constantes de partición octanol-agua y octanol-aire, su biodegradabilidad, entre otras (Cancelli y Gobas, 2024; Overton et al., 2023; Salah et al., 2023a; Zhang et al., 2023).

Ante la falta de disponibilidad de recursos hídricos para las diferentes actividades consuntivas⁹ y pese a los resultados satisfactorios obtenidos con los HT de diseño clásico, es necesario disminuir el área por habitante-equivalente y al mismo tiempo mejorar los porcentajes de remoción de los MCO, especialmente de aquellos más refractarios o que entrañan riesgos. Destacan, como por ejemplo, los antibióticos y disruptores endocrinos. Esto puede lograrse intensificando los procesos o combinando con otras tecnologías de tratamiento como las pilas de combustible microbianas, los procesos de membrana, la electrooxidación, el uso de nanomateriales, entre otras (Fu et al., 2023; Gebru y Werkneh, 2024; Muduli et al., 2023; Rajput et al., 2024; Wagner et al., 2023). A continuación se dan algunos ejemplos.

Intensificación de los procesos en los HT

La Tabla 2 muestra referencias recientes que ilustran las distintas formas de lograr la intensificación de los procesos en los HT.

Tabla 2. Ejemplos de intensificación de los procesos en los HT

Modo de intensificación	Tipo de HT, MCO	Referencia
Aireación	HFSSH escala mesocosmos, ibuprofen y paracetamol	Al-Falahi et al. (2022)
Recirculación de efluentes	Laguna facultativa y HFSSH a escala piloto, varios fármacos	Herrera-Melián et al. 2023
Variantes de diseño, adsorbentes en el medio soporte, aireación	HFSSH operados por lotes, varios fármacos	Lei et al. (2023)
Bioaumentación con hongos micorrízicos arbusculares	HFSSV a escala de laboratorio, sulfametoxazol, Cu y Cd	Jiang et al. (2023)
Biocarbones en el medio soporte; adición de nutrientes; aireación, bioaumentación	HTPF a nivel de mesocosmos, aguas contaminadas con amoxicilina	Bano et al. (2023)
Bioaumentación	HFSSV bacterias que remueven atrazina, atrazina	Chen et al. (2023)
Uso de adsorbentes en el medio soporte	HFSSV a nivel de mesocosmos con turba de coco y lana mineral con pantas ornamentales, varios fármacos y plaguicidas	Sithamparanathan et al. (2024)
Bioaumentación con tricoderma	HFSSV a nivel de mesocosmos, varios MCO y sus metabolitos	Tadić et al. (2024)
Uso de adsorbentes en el medio soporte	HFSSV a nivel de mesocosmos con concreto y cemento, estrona, 17 α -estradiol y 17 β -etinilestradiol	Silva et al. (2024)
Uso de adsorbentes en el medio soporte	HTH con carbón activado, carbón de hueso de coral y zeolita, antibióticos	Shi et al. (2024)

HT: Humedales de tratamiento; MCO: Microcontaminantes orgánicos; HFSSH: Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial horizontal; HTFSSV: Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial vertical; Cu: Cobre; Cd: Cadmio; HTPF: Humedales de tratamiento de plantas flotantes; HTH: Humedales de tratamiento híbridos

La intensificación de los procesos de remoción se logra modificando parámetros de diseño u operación de los sistemas y combinaciones de estas: Aireación, llenado y drenaje alternos de HT contiguos, utilizando adsorbentes en el medio soporte, dosificando sustancias químicas que coadyuven

⁹ Adjetivo muy usado por la Comisión Nacional del Agua de México para referirse al consumo de agua en los diferentes rubros en la nación (<https://dle.rae.es/consuntivo>: Perteneiente o relativo al consumo [nota de los(as) editores(as)])

determinados procesos de remoción, la bioaugmentación, recirculación de efluentes, cambios en los ciclos de trabajo, entre otras opciones (Fu et al., 2023; Pascual et al., 2024; Salah et al., 2023b; Sossalla et al., 2022; Xu et al., 2024; Yang y Yang, 2023; Zhang et al., 2024a).

Combinaciones de tecnologías

Dado que existen muchos procesos avanzados para la remoción de los MCO, son múltiples las posibles combinaciones de estos con los distintos tipos de HT. Esto explica la amplia experimentación en este sentido y, en particular el interés en las celdas de combustible microbiano, CCM (Patyal et al., 2023; Verma y Ray, 2024). En la Tabla 3 se muestran referencias recientes sobre la combinación de tecnologías.

Tabla 3. Ejemplos de combinación de tecnologías con los HT

Tecnología que se combina	Tipo de HT, MCO	Referencia
Fotólisis UV	Digestor híbrido/HFSSV/Fotólisis, varios PCP	Sánchez et al. (2023)
CCM	HFSSV a escala de laboratorio, ibuprofeno	Youssef et al. (2023)
Oxidación biológica por contacto, uso de adsorbentes en el medio soporte	Oxidación/HFSSV, escala mesocosmos, triclocarban, triclosan y sulfadiazina	Cai et al. (2023)
CCM	HFSSV a escala de laboratorio, tetraciclina y cloranfenicol	Maldonado et al. (2023)
Bioreactor de lecho móvil	HFSSH a escala de laboratorio, paracetamol	Kamilya et al. (2023)
Fotocatálisis	Bioreactor/sedimentador/HFSSH/Fotocatálisis a escala piloto, Carbamazepina	Majumder et al. (2024)
Proceso foto-Fenton	HFSSV a escala de microcosmos/reactor foto-Fenton solar, varios fármacos	López-Vinent et al. (2024)

HT: Humedales de tratamiento; MCO: Microcontaminantes orgánicos; UV: Ultravioleta; CCM: Celdas de combustible microbiano; HFSSV: Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial vertical; PCP: Productos de cuidado personal; HFSSH: Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial horizontal

Conclusiones

Los HT son altamente efectivos y eficaces al remover muchos de los MCO presentes en las aguas domésticas y municipales.

No obstante, un grupo considerable de MCO son resistentes a los procesos de remoción en los HT por lo que las alternativas de intensificar los procesos por diferentes vías o combinar los HT con otras tecnologías de remoción se encuentran cada vez más en el centro de la atención de las investigaciones.

GLOSARIO

Término o siglas	Significado
BRA	Bacterias resistentes a los antibióticos
CCM	Celdas de combustible microbiano
Cd	Cadmio
CE	Contaminantes emergentes
Cu	Cobre
GRA	Genes resistentes a los antibióticos
HIFV	Humedales integrados de flujo vertical
HT	Humedales de tratamiento
HTH	Humedales de tratamiento híbridos
HTFS	Humedales de tratamiento de flujo superficial
HTFSSH	Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial horizontal

Término o siglas	Significado
HTFSSV	Humedales de tratamiento de flujo sub-superficial vertical
HTPF	Humedales de tratamiento de plantas flotantes
MCO	Microcontaminantes orgánicos
PCP	Productos de cuidado personal
SBN	Soluciones Basadas en la Naturaleza
WWAP, UN WWAP	Siglas en inglés para el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (<i>United Nations World Water Assessment Programme</i>)

RECONOCIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo editorial de la revista por tener la oportunidad de contribuir al conocimiento de estos sistemas naturales. Las autoras agradecen a todos y todas los(as) colegas de la Red Temática del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que hasta este año incorporó a las humanidades en sus siglas (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías) sobre la Calidad y Disponibilidad del Agua por sus valiosas aportaciones para mejorar la calidad del agua en México. Los tres autores quieren por esta vía reconocer a las dos diputadas de la legislación anterior y la actual, la Diputada María Marivel Solís Barrera y la Diputada María Eugenia Hernández Pérez, Coordinadora Temática de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación del Grupo Parlamentario de Morena en la LXV Legislatura del Congreso de la Unión, así como a su colaborador cercano el Lic. Daniel Ibarra Cruz, por su generoso y decidido apoyo para promover políticas de mejoramiento del uso del valioso recurso hídrico a lo largo de estos últimos años.

Referencias

- Abdelkareem, M.A., Ayoub, M., Khuri, S., Alami, A.H., Sayed, E.T., Deepa, T.D., Olabi, A.G. 2023. Environmental aspects of batteries. *Sustainable Horizons*. 8(100074). <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2023.100074>
- Abd-ur-Rehman, H.M., Prodanovic, V., Deletic, A., Khan, S.J., McDonald, J.A., Zhang, K. 2023. Removal of hydrophilic, hydrophobic, and charged xenobiotic organic compounds from greywater using green wall media. *Water Research*. 242:120290. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120290>
- Adeel, M., Maniakova, G., Rizzo, L. 2024. Tertiary/quaternary treatment of urban wastewater by UV/H₂O₂ or ozonation: Microplastics may affect removal of *E. coli* and contaminants of emerging concern. *The Science of the Total Environment*. 907:167940. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167940>
- Ajaz, S., Aly Hassan, A., Michael, R.N., Leusch, F.D.L. 2024. Removal of organic micropollutants in biologically active filters: A systematic quantitative review of key influencing factors. *Journal of Environmental Management*. 353:120203. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120203>
- Akyürek, A., Ağdağ, O.N. 2024. Comparison of constructed wetlands and package type sequencing batch biological treatment plants in rural areas in terms of efficiency and cost in a full-scale example. *Ecological Engineering*. 201:107190. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107190>
- Al-Falahi, O.A., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.A., Othman, A.R., Ewadh, H.M., Al-Baldawi, I.A., Sharuddin, S.S.N., Kurniawan, S.B., Ismail, N. 2022. Elimination of mixed ibuprofen and paracetamol from spiked domestic wastewater via a pilot continuous aerated sub-surface constructed wetland system. *Journal of Water Process Engineering*. 50:103308. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103308>
- Al-Mashaqbeh, O., Alsalmi, L., Salaymeh, L., Lyu, T. 2023. Assessment of novel hybrid treatment wetlands as nature-based solutions for pharmaceutical industry wastewater treatment. *Water and Environment Journal: The Journal*. <https://doi.org/10.1111/wej.12907>
- Alsubih, M., El-Morabet, R., Khan, R.A., Khan, N.A., Khan, A.R., Khan, S., Mushtaque, N., Hussain, A., Yousefi, M. 2022. Performance evaluation of constructed wetland for removal of pharmaceutical compounds from hospital wastewater: Seasonal perspective. *Arabian Journal of Chemistry*. 15(12):104344. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104344>
- Bano, S., Tahira, S.A., Naqvi, S.N.H., Tahseen, R., Shabir, G., Iqbal, S., Afzal, M., Amin, M., Boopathy, R., Mehmood, M.A. 2023. Improved remediation of amoxicillin-contaminated water by floating treatment wetlands intensified with biochar, nutrients, aeration, and antibiotic-degrading bacteria. *Bioengineered*. 14(1):2252207. <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2252207>
- Bazúa-Rueda, E.R., Bernal-González, M., Cano-Rodríguez, M.I., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Espinosa-Aquino, B., García-Gómez, R.S., Herrera-Cárdenas, J.A., Kappelmeier, U., Navarro-Frómata, A.E., Ramírez-Burgos, L.I., Ruiz-Cárdenas, N.J., Salinas-Juárez, M.G., Salgado-Bernal, I., Sánchez-Tovar, S.A., Solís-Fuentes, J.A. 2019. Aplicaciones de la química al tratamiento de aguas residuales: Casos de estudio en México y Cuba / *Chemistry applications to wastewater treatment: Case studies in Mexico and Cuba*. *Revista Cubana de Química*. Número Especial:105-133.

- <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31s1/2224-5421-ind-31-s1-105.pdf>,
<https://www.redalyc.org/journal/4435/443562640007/html/>
- Beisso, F., Navarro-Frómata, A.E. 2022. Opciones técnicas de saneamiento para las comunidades pequeñas. Un ejemplo creativo con la de Dieulefit, Francia: Una estación de depuración por lodos activados o una estación de depuración por humedales construidos o artificiales equipados de aireación forzada. *Ambiens Techné et Scientia México*. 10(2):221-238. <https://atsmexico.org/atsm/article/view/126>
- Bodus, B., O'Malley, K., Dieter, G., Gunawardana, C., McDonald, W. 2024. Review of emerging contaminants in green stormwater infrastructure: Antibiotic resistance genes, microplastics, tire wear particles, PFAS, and temperature. *The Science of the Total Environment*. 906:167195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167195>
- Brown, G.C., MacAdam, J., Dotro, G., Jefferson, B. 2023. A wholelife cost and carbon perspective of alternatives to septic tanks utilising nature-based solutions. *H₂Open Journal*. 6(3):361–372. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2023.002>
- Brunhoferova, H., Venditti, S., Hansen, J., Gallagher, J. 2024. Life cycle performance and associated environmental risks of constructed wetlands used for micropollutant removal from municipal wastewater effluent. *Cleaner Environmental Systems*. 12:100162. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100162>
- Buscaroli, E., Lavrnić, S., Blasioli, S., Gentile, S.L., Solimando, D., Mancuso, G., Anconelli, S., Braschi, I., Toscano, A. 2024. Efficient dissipation of acetamiprid, metalaxyl, S-metolachlor and terbuthylazine in a full-scale free water surface constructed wetland in bologna province, Italy: A kinetic modeling study. *Environmental Research*. 118275. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118275>
- Cai, Q., Zeng, J., Lin, X., Xia, D., Yu, W., Qiu, J., Yang, M., Wang, X. 2023. Study on the Effect of AO-Coupled Constructed Wetlands on Conventional and Trace Organic Pollutant Treatment. *ACS Omega*. 8(42):38983–38990. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03461>
- Cancelli, A.M., Gobas, F.A.P.C. 2024. Development and testing of a mechanistic model for wetland treatment of neutral and polar organic contaminants in oil sands process-affected water. *Ecological Engineering*. 198:107145. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107145>
- Carvalho, P.N., Matamoros, V. 2022. Nature-Based Solutions for the Mitigation of Persistent and Emerging Contaminants. *Water*. 14(13):2105. <https://doi.org/10.3390/w14132105>
- Chen, S., Ma, L., Yao, G., Wang, Y. 2023. Efficient atrazine removal in bioaugmentation constructed wetland: Insight from stable isotope fractionation analysis. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 185:105691. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2023.105691>
- Chen, Y., Tan, Y., Feng, Y., Dong, T., Jiang, C., Wang, C., Yang, Y., Zhang, Z. 2024. Selected legacy and emerging organic contaminants in sediments of China's Yangtze - the world's third longest river: Response to anthropogenic activities. *Environmental Pollution*. 346:123608. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123608>
- Cifuentes, J.I., Rivera, P., Paiz, J., Cortez, J., Barrera, A. 2023. Comparison of contaminants removal efficiencies in wastewater using constructed wetlands of single and two stages. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Investigación, Desarrollo y Práctica. 16(2):697–710. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.2.83506>
- Clímaco-Cunha, I.L., Machado, P.G., de-Oliveira-Ribeiro, C., Kulay, L. 2024. Bibliometric analysis of advanced oxidation processes studies with a focus on life cycle assessment and costs. *Environmental Science and Pollution Research International*. 10.1007/s11356-024-32558-w. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32558-w>
- David, G., Rana, M.S., Saxena, S., Sharma, S., Pant, D., Prajapati, S.K. 2023. A review on design, operation, and maintenance of constructed wetlands for removal of nutrients and emerging contaminants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 20(8):3. <https://doi:10.1007/s13762-022-04442-y>
- de-Campos, S.X., Soto, M. 2024. The use of constructed wetlands to treat effluents for water reuse. *Environments*. 11(2):35. <https://doi.org/10.3390/environments11020035>
- Deng, N., Liu, C., Tian, Y., Song, Q., Niu, Y., Ma, F. 2024. Assembly processes of rhizosphere and phyllosphere bacterial communities in constructed wetlands created via transformation of rice paddies. *Frontiers in Microbiology*. 15:1337435. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1337435>
- DOF. 2024. Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Drzymala, J.; Kalka, J.; Sochacki, A.; Felis, E. 2022. Towards sustainable wastewater treatment: Bioindication as a technique for supporting treatment efficiency assessment. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 19:11859. <https://doi.org/10.3390/ijerph191911859>
- Dubey, M., Vellanki, B.P., Kazmi, A.A. 2023. Emerging contaminants in conventional and advanced biological nutrient removal based wastewater treatment plants in India - insights into the removal processes. *The Science of the Total Environment*. 894:165094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165094>
- Felis, E., Sochacki, A., Bajkacz, S., Łuczkiwicz, A., Józwiakowski, K., García, J., Vymazal, J. 2024. Removal of selected sulfonamides and sulfonamide resistance genes from wastewater in full-scale constructed wetlands. *The Science of the Total Environment*. 912:169195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169195>
- Feng, W., Deng, Y., Yang, F., Miao, Q., Ngien, S.K. 2023. Systematic review of contaminants of emerging concern (CECs): Distribution, risks, and implications for water quality and health. *Water*. 15:3922. <https://doi.org/10.3390/w15223922>
- Fu, Y., Xu, R., Yang, B., Wu, Y., Xia, L., Tawfik, A., Meng, F. 2023. Mediation of Bacterial Interactions via a Novel Membrane-Based Segregator to Enhance Biological Nitrogen Removal. *Applied and Environmental Microbiology*. 89(7): e00709-23. <https://doi.org/10.1128/aem.00709-23>
- Fu, T., Du, L., Wu, S., Zhao, M., Zheng, X., Wang, Z., Zhang, Y., Fan, C., Wang, W., Ran, F., Lin, P., Zhong, C. 2024. Synthesis and application of wetland plant-based functional materials for aqueous antibiotics removal. *The Science of the Total Environment*. 908:168214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168214>

- Gao, X., Yang, J., Song, J., Wu, S., Li, M., Li, J., Chen, X., Qin, H., Luan, H., Chen, Z., Yu, K., Liu, W. 2024. Toxicity removal from contaminated water by constructed wetlands assessed using multiple biomarkers in human stem cell assays. *The Science of the Total Environment*. 925:171682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171682>
- García-Muñoz, P., Robert, D., Ruppert, A.M., Keller, N. 2023. Microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs): Introduction. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Pp. 1–32. Elsevier. Países Bajos.
- Gebru, S.B., Werkneh, A.A. 2024. Applications of constructed wetlands in removing emerging micropollutants from wastewater: Occurrence, public health concerns, and removal performances – A review. *South African Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.03.004>.
- Gonzalez-Flo, E., Romero, X., García, J. 2023. Nature based-solutions for water reuse: 20 years of performance evaluation of a full-scale constructed wetland system. *Ecological Engineering*. 188:106876. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106876>
- Goyat, R., Singh, J., Umar, A., Saharan, Y., Ibrahim, A.A., Akbar, S., Baskoutas, S. 2024. Synthesis and characterization of nanocomposite based polymeric membrane (PES/PVP/GO-TiO₂) and performance evaluation for the removal of various antibiotics (amoxicillin, azithromycin & ciprofloxacin) from aqueous solution. *Chemosphere*. 141542. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141542>
- Guerrero-Brotons, M., Perujo, N., Romani, A.M., Gómez, R. 2024. Advantages of using a carbon-rich substrate in a constructed wetland for agricultural water treatment: Carbon availability and biota development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 360:108792. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108792>
- Gupta, A., Kumar, S., Bajpai, Y., Chaturvedi, K., Johri, P., Tiwari, R.K., Vivekanand, V., Trivedi, M. 2024. Pharmaceutically active micropollutants: Origin, hazards and removal. *Frontiers in Microbiology*. 15:1339469. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1339469>
- Herrera-Melián, J.A., Guedes-Alonso, R., Tite-Lescano, J.C., Sosa-Ferrera, Z., Santana-Rodríguez, J.J. 2023. Enhancing pharmaceutical removal in a full-scale constructed wetland with effluent recirculation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 11(6):111167. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111167>
- Hu, Y., Gao, L., Ma, C., Wang, H., Zhou, C. 2023. The comprehensive reduction capacity of five riparian vegetation buffer strips for primary pollutants in surface runoff. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*. 13(6):3898. <https://doi.org/10.3390/app13063898>
- Impellitteri, F., Multisanti, C.R., Rusanova, P., Piccione, G., Falco, F., Faggio, C. 2023. Exploring the impact of contaminants of emerging concern on fish and invertebrates physiology in the Mediterranean Sea. *Biology*. 12(6):767. <https://doi.org/10.3390/biology12060767>
- Imwene, K.O., Ngumba, E., Kairigo, P.K. 2022. Emerging technologies for enhanced removal of residual antibiotics from source-separated urine and wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 322:116065. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116065>
- Instituto Superior del Medio Ambiente. 2022. <https://www.ismedioambiente.com/soluciones-basadas-en-la-naturaleza-para-afrentar-los-retos-de-la-agenda-2030-y-ods/>
- Jena, G., Dutta, K., Daverey, A. 2023. Surfactants in water and wastewater (greywater): Environmental toxicity and treatment options. *Chemosphere*. 341:140082. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140082>
- Jiang, Y., Zhao, Y., Liu, Y., Ban, Y., Li, K., Li, X., Zhang, X., Xu, Z. 2023. Removal of sulfamethoxazole and Cu, Cd compound pollution by arbuscular mycorrhizal fungi enhanced vertical flow constructed wetlands. *Environmental Research*. 245:117982. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117982>
- Jing, Y., Miltner, A., Eggen, T., Kästner, M., Nowak, K.M. 2022. Microcosm test for pesticide fate assessment in planted water filters: ¹³C,¹⁵N-labeled glyphosate as an example. *Water Research*. 226:119211. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119211>
- Kamilya, T., Majumder, A., Saidulu, D., Tripathy, S., Gupta, A.K. 2023. Optimization of a continuous hybrid moving bed biofilm reactor and constructed wetland system for the treatment of paracetamol-spiked domestic wastewater. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*. 477:147139–147139. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147139>
- Karki, B.K., Philip, L. 2024. Fate of pharmaceuticals and personal care products like metronidazole, naproxen, and methylparaben and their effect on the physiological characteristics of two wetland plants. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*. 483:149180. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149180>
- Kondor, A.C., Vancsik, A.V., Bauer, L., Szabó, L., Szalai, Z., Jakab, G., Maász, G., Pedrosa, M., Sampaio, M.J., Lado-Ribeiro, A.R. 2024. Efficiency of the bank filtration for removing organic priority substances and contaminants of emerging concern: A critical review. *Environmental Pollution*. 340:122795. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122795>
- Kumar, M., Sridharan, S., Sawarkar, A.D., Shakeel, A., Aneero, P., Mannina, G., Sharma, P., Pandey, A. 2023. Current research trends on emerging contaminants pharmaceutical and personal care products (PPCPs): A comprehensive review. *The Science of the Total Environment*. 859(Part 1):160031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160031>
- Kumar, V., Pallavi, P., Sen, S.K., Raut, S. 2024. Harnessing the potential of white rot fungi and ligninolytic enzymes for efficient textile dye degradation: A comprehensive review. *Water Environment Research (Water Environment Federation)*. 96(1):e10959. <https://doi.org/10.1002/wer.10959>
- Larrea-Murrell, J.A., Romeu-Alvarez, B., Petre, A., Salcedo-Gómez, A., Lugo-Moya, D., Rojas-Badía, M.M., Boltes, K. 2024. Presence of pharmaceutical contaminants of emerging concern in two rivers of western Cuba and their relationship with the extracellular enzymatic activity of microbial communities. *Environmental Pollution*. 346:123589. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123589>
- Lei, Y., Wagner, T., Rijnaarts, H., de Wilde, V., Langenhoff, A. 2023. The removal of micropollutants from treated effluent by batch-operated pilot-scale constructed wetlands. *Water Research*. 230:119494. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119494>

- Li, Z., Kong, L., Hu, L., Wei, J., Zhang, X., Guo, W., Shi, W. 2024. Greenhouse gas emissions from constructed wetlands: A bibliometric analysis and mini-review. *The Science of the Total Environment*. 906:167582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167582>
- Lin, X., Fang, H., Li, S., Fu, S., Zhang, B., Zhou, W., Xu, J., Huang, J. 2023. Research progress and application exploration of techniques to remove emerging contaminants from water environment. *E3S Web of Conferences*. 393:01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339301017>
- Liu, S., Zhang, Y., Feng, X., Pyo, S.-H. 2024a. Current problems and countermeasures of constructed wetland for wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*. 57:104569. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104569>
- Liu, Y., Li, Y., Yin, W., Wang, H.-C., Zhao, X., Liu, X., Lu, S., Wang, A.-J. 2024b. Long-term performance of a deep oxidation pond with horizontal subsurface flow constructed wetland for purification of rural polluted river water. *Environmental Research*. 240:117498. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117498>
- López-Serna, R., Franco, B., Bolado, S., Jiménez, J.J. 2024. Removal of contaminants of emerging concern from pig manure in different operation stages of a thin-layer cascade photobioreactor. Relationship with concentrations in microalgae and manure. *Journal of Environmental Management*. 354:120340. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120340>
- López-Vinent, N., Cruz-Alcalde, A., Santacruz, A.P., Sans, C. 2024. Green approach for micropollutants removal: Study of constructed wetlands as pretreatment of solar photo-Fenton catalyzed by organic fertilizers. *Catalysis Today*. 430:114540. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114540>
- Ma, X.Y., Lin, Y., Zheng, Y., Wang, X.C., Chen, W., Chen, Y., An, Y., Jia, H. 2022. Seasonal reduction of trace organic pollutants and biotoxicity in hybrid constructed wetlands. *Journal of Water Process Engineering*. 47:102766. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102766>
- Majumder, A., Otter, P., Röher, D., Bhatnagar, A., Khalil, N., Gupta, A.K., Bresciani, R., Arias, C.A. 2024. Combination of advanced biological systems and photocatalysis for the treatment of real hospital wastewater spiked with carbamazepine: A pilot-scale study. *Journal of Environmental Management*. 351:119672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119672>
- Maldonado, I., Moreno-Terrazas, E.G., Mamani, J.M., Vilca, F.Z. 2023. Removal of tetracycline and chloramphenicol through constructed wetlands: Roles of plants, substrates, and microbial fuel cells. *Results in Engineering*. 17:100982. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100982>
- Mancuso, G., Lavrić, S., Canet-Martí, A., Zaheer, A., Avolio, F., Langergraber, G., Toscano, A. 2023. Performance of lagoon and constructed wetland systems for tertiary wastewater treatment and potential of reclaimed water in agricultural irrigation. *Journal of Environmental Management*. 348:119278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119278>
- Manetti, M., Tomei, M.C. 2024. Anaerobic removal of contaminants of emerging concern in municipal wastewater: Ecotoxicological risk evaluation and strategic selection of optimal treatment. *The Science of the Total Environment*. 912:168895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168895>
- Mao, J., Hu, G., Deng, W., Zhao, M., Li, J. 2023. Industrial wastewater treatment using floating wetlands: A review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 10.1007/s11356-023-31507-3. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31507-3>
- Marín-Muñiz, J.L., Sandoval Herazo, L.C., López-Méndez, M.C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R.Á., González-Moreno, H.R., Zamora, S. 2023. Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: A review of experiences during the last twenty-two years. *Processes (Basel, Switzerland)*. 11(2):359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Martel-Rodríguez, G.M., Millán-Gabet, V., Mendieta-Pino, C.A., García-Romero, E., Sánchez-Ramírez, J.R. 2022. Long-Term performance of a hybrid-flow constructed wetlands system for urban wastewater treatment in Caldera de Tirajana (Santa Lucía, Gran Canaria, Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(22):14871. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214871>
- Masharqa, A., Al-Tardeh, S., Mlih, R., Bol, R. 2023. Vertical and hybrid constructed wetlands as a sustainable technique to improve domestic wastewater quality. *Water*. 15(19):3348. <https://doi.org/10.3390/w15193348>
- Matos, F.A., Roebeling, P. 2022. Modelling impacts of Nature-Based Solutions on surface water quality: A rapid review. *Sustainability*. 14(12):7381. <https://doi.org/10.3390/su14127381>
- Mehariya, S., Das, P., Thaher, M.I., Abdul Quadir, M., Khan, S., Sayadi, S., Hawari, A.H., Verma, P., Bhatia, S.K., Karthikeyan, O.P., Zuorro, A., Al-Jabri, H. 2024. Microalgae: A potential bioagent for treatment of emerging contaminants from domestic wastewater. *Chemosphere*. 351:141245. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141245>
- Mohsin, H., Amina, N., Irfan, A., Ishtiaq, H., Riaz, H., Shahbaz, A., Shahbaz, I. 2023. Significance of constructed wetlands in combating pollutants from wastewater: A sustainable development perspective. *Advances in Civil and Architectural Engineering*. 14(27):171-190. <https://doi.org/10.13167/2023.27.12>
- Msaki, G.L., Kaale, S.E., Njau, K.N., Lyimo, T.J. 2023. Bacterial communities structure in constructed wetlands for municipal and industrial wastewater treatment in Tanzania. *Water Practice and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.155>
- Muduli, M., Choudharya, M., Ray, S. 2023. A review on constructed wetlands for environmental and emerging contaminants removal from wastewater: Traditional and recent developments. *Environ. Dev. Sustain*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04190-0>
- Mumtaj, Z.A., Khan, A.R., Alsubih, M., Aleya, L., Khan, R.A., Khan, S. 2024. Removal of pharmaceutical contaminants from hospital wastewater using constructed wetlands: A review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 10.1007/s11356-024-32022-9. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32022-9>
- Nan, X., Lavrić, S., Mancuso, G., Toscano, A. 2023. Effects of design and operational conditions on the performance of constructed wetlands for agricultural pollution control – Critical review. *Water Air Soil Pollution*. 234:434. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06380-y>
- Navarro-Frómata, A.E. 2023. Organic micropollutants in the different environmental compartments. *Journal of Engineering Research*. 3(27):2–11. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3173272314087>

- Navarro-Frómata, A.E., Durán-Domínguez, M.d.C. 2019. El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: Los humedales construidos, una tecnología a considerar / *Decentralized treatment of suburban and small rural communities: artificial or constructed wetlands, a technology to consider*. Revista Cubana de Química. Número Especial:87-104. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31s1/2224-5421-ind-31-s1-87.pdf>
- Overton, O.C., Olson, L.H., Majumder, S.D., Shwiyat, H., Foltz, M.E., Nairn, R.W. 2023. Wetland removal mechanisms for emerging contaminants. *Land*. 12(2):472. <https://doi.org/10.3390/land12020472>
- Pascual, A., Álvarez, J.A., de-la-Varga, D., Arias, C.A., Van-Oirschot, D., Kilian, R., Soto, M. 2024. Horizontal flow aerated constructed wetlands for municipal wastewater treatment: The influence of bed depth. *The Science of the Total Environment*. 908:168257. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168257>
- Patro, A., Gupta, S., Dwivedi, S., Mishra, P.M., Yadav, A.K. 2024. Spectrometric evidences to resolve the debate on direct role of macrophyte in organic pollutant removal and degradation in constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*. 483:148740. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148740>
- Patyal, V., Jaspal, D., Khare, K. 2023. Performance enhancement of constructed wetlands for wastewater remediation by modifications and integration of technologies: A review. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 42(1):1-13. <https://doi.org/10.1002/ep.13951>
- Pinedo-Hernández, J., Marrugo-Negrete, J., Pérez-Espitia, M., Durango-Hernández, J., Enamorado-Montes, G., Navarro-Frómata, A. 2024. A pilot-scale electrocoagulation-treatment wetland system for the treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Management*. 351:119681. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119681>
- Plaimart, J., Acharya, K., Blackburn, A., Mroziak, W., Davenport, R.J., Werner, D. 2024. Effective removal of iron, nutrients, micropollutants, and faecal bacteria in constructed wetlands cotreating mine water and sewage treatment plant effluent. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*. 89(1):116-131. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.001>
- Poddar, K., Sarkar, D., Bhoi, R., Sarkar, A. 2024. Biotransformation of diclofenac by isolated super-degrader *Pseudomonas* sp. DCq4: Postulated pathways, and attenuated ecotoxicological effects. *Environmental Pollution*. 344:123388. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123388>
- Qi, Y., Zhong, Y., Luo, L., He, J., Feng, B., Wei, Q., Zhang, K., Ren, H. 2024. Subsurface constructed wetlands with modified biochar added for advanced treatment of tailwater: Performance and microbial communities. *The Science of the Total Environment*. 906:167533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167533>
- Rajput, P., Kumar, P., Priya, A.K., Kumari, S., Shiade, S.R.G., Rajput, V.D., Fathi, A., Pradhan, A., Sarfraz, R., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Minkina, T., Soldatov, A., Wong, M.H., Rensing, C. 2024. Nanomaterials and biochar mediated remediation of emerging contaminants. *The Science of the Total Environment*. 916:170064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170064>
- Rangappa, H.S., Herath, I., Lin, C., Ch, S. 2024. Industrial waste-based adsorbents as a new trend for removal of water-borne emerging contaminants. *Environmental Pollution*. 343:123140. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123140>
- Rizzo, A., Sarti, C., Nardini, A., Conte, G., Masi, F., Pistocchi, A. 2023. Nature-based solutions for nutrient pollution control in European agricultural regions: A literature review. *Ecological Engineering*. 186:106772. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106772>
- Salah, M., Zheng, Y., Wang, Q., Li, C., Li, Y., Li, F. 2023a. Insight into pharmaceutical and personal care products removal using constructed wetlands: A comprehensive review. *The Science of the Total Environment*. 885:163721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163721>
- Salah, M., Zheng, Y., Wang, Q., Li, Y., Li, F. 2023b. Response of remediation performances and microbial communities of integrated vertical-flow constructed wetlands with different configurations after chronic exposure to pharmaceuticals and personal care products. *Journal of Water Process Engineering*. 56:104490. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104490>
- Sánchez, M., Ramos, D.R., Fernández, M.I., Aguilar, S., Ruiz, I., Canle, M., Soto, M. 2022. Removal of emerging pollutants by a 3-step system: Hybrid digester, vertical flow constructed wetland and photodegradation post-treatments. *The Science of the Total Environment*. 842:156750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156750>
- Sánchez, M., Fernández, M.I., Ruiz, I., Canle, M., Soto, M. 2023. Combining constructed wetlands and UV photolysis for the advanced removal of organic matter, nitrogen, and emerging pollutants from wastewater. *Environments*. 10(3):35. <https://doi.org/10.3390/environments10030035>
- Sandoval, M.A., Calzadilla, W., Vidal, J., Brillas, E., Salazar-González, R. 2024. Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America. *Environmental Pollution*. 345:123397. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123397>
- Shah, M.P. (Ed.). 2023. Recent trends in constructed wetlands for industrial wastewater treatment. Springer Nature, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-2564-3>
- Sharma, S., Asolekar, S.R., Thakur, V.K., Asokan, P. 2024. Unlocking the potential: A paradigm-shifting approach for valorizing lignocellulosic waste biomass of constructed wetland enabling environmental and societal sustainability. *Industrial Crops and Products*. 207:117709. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117709>
- Shi, B., Cheng, X., Zhu, D., Jiang, S., Chen, H., Zhou, Z., Xie, J., Jiang, Y., Liu, C., Guo, H. 2024. Impact analysis of hydraulic loading rate and antibiotics on hybrid constructed wetland systems: Insight into the response to decontamination performance and environmental-associated microbiota. *Chemosphere*. 347(140678), 140678. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140678>
- Shi, Q., Yuan, Y., Zhou, Y., Yuan, Y., Liu, L., Liu, X., Li, F., Leng, C., Wang, H. 2023. Pharmaceutical and personal care products (PPCPs) degradation and microbial characteristics of low-temperature operation combined with constructed wetlands. *Chemosphere*. 341:140039. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140039>
- Silva, L.-de-C., Bernardelli, J.K.B., Souza, A. de O., Lafay, C.B.B., Nagalli, A., Passig, F.H., Kreutz, C., Carvalho, K.Q. 2024. Biodegradation and sorption of nutrients and endocrine disruptors in a novel concrete-based substrate in vertical-flow constructed wetlands. *Chemosphere*. 346:140531. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140531>

- Singh, S., Sharma, P.K., Rani, A., Alotaibi, K.M. 2024. Assessing lab-scale hybrid wetland performance for pollutant and pathogen removal from high organic loading septage. *Groundwater for Sustainable Development*. 25:101097. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101097>
- Sithamparanathan, E., Kujawa-Roeleveld, K., Rijnaarts, H.H.M., Sutton, N.B. 2024. Hydroponic materials improve organic micropollutant removal in vertical flow constructed wetlands treating wastewater. *Chemosphere*. 352:141388. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141388>
- Sossalla, N.A., Nivala, J., Escher, B.I., Schlichting, R., van-Afferden, M., Müller, R.A., Reemtsma, T. 2022. Impact of various aeration strategies on the removal of micropollutants and biological effects in aerated horizontal flow treatment wetlands. *The Science of the Total Environment*. 828:154423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154423>
- Stefanatos, A., Lagkadas, M., Petousi, I., Schiza, S., Stasinakis, A.S., Fyllas, N., Fountoulakis, M.S. 2024. Vertical flow constructed wetlands as green façades and gardens for on-site greywater treatment in buildings: Two-year mesocosm study on removal performance. *The Science of the Total Environment*. 906:167362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167362>
- Tadić, Đ., Sauvêtre, A., Cerqueira, F., Lestremou, F., Ait-Mouheb, N., Chiron, S. 2024. Partially saturated vertical surface flow constructed wetland for emerging contaminants and antibiotic resistance genes removal from wastewater: The effect of bioaugmentation with *Trichoderma*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12(2):112128. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112128>
- Tao, D., Jin, Q., Ruan, Y., Zhang, K., Jin, L., Zhan, Y., Su, G., Wu, J., Leung, K.M.Y., Lam, P.K.S., He, Y. 2022. Widespread occurrence of emerging e-waste contaminants – liquid crystal monomers in sediments of the Pearl River estuary, China. *Journal of Hazardous Materials*. 437:129377. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129377>
- UN WWAP. 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. United Nations World Water Assessment Programme/UN-Water. UNESCO. Paris, Francia. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2018>
- Verma, P., Ray, S. 2024. Critical evaluation of electroactive wetlands: Traditional and modern advances. *Environmental Science and Pollution Research International*. 31:14349-14366. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32115-5>
- Vymazal, J. 2024. Natural and constructed wetlands for ecosystem restoration (at the occasion of 30 years anniversary of *Ecological Engineering Journal*. *Ecological Engineering*. 201:107188. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107188>
- Wagner, T.V., Rempe, F., Hoek, M., Schuman, E., Langenhoff, A. 2023. Key constructed wetland design features for maximized micropollutant removal from treated municipal wastewater: A literature study based on 16 indicator micropollutants. *Water Research*. 244:120534. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120534>
- 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*. 13:845725. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845725>
- Wang, X., Li, J., Wang, M., Zhang, C., Xue, M., Xie, H. 2024. Sulfadiazine chlorination disinfection by-products in constructed wetlands: Identification of biodegradation products and inference of transformation pathways. *Environmental Pollution*. 344:123310. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123310>
- Wang, Y., Bai, J., Zhang, L., Liu, H., Wang, W., Liu, Z., Zhang, G. 2023. Advances in studies on the plant rhizosphere microorganisms in wetlands: A visualization analysis based on Cite Space. *Chemosphere*. 317:137860. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137860>
- Wei, J., Cotterill, S., Keenahan, J. 2024. Optimizing the hydraulic performance of a baffled horizontal subsurface flow constructed wetland through computational fluid dynamics modelling. *Journal of Environmental Management*. 351:119776. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119776>
- Wen, J., Duan, L., Wang, B., Dong, Q., Liu, Y., Chen, C., Huang, J., Yu, G. 2024. In-sewer stability assessment of 140 pharmaceuticals, personal care products, pesticides and their metabolites: Implications for wastewater-based epidemiology biomarker screening. *Environment International*. 184:108465. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108465>
- Werkneh, A.A., Gebru, S.B., Redae, G.H., Tsige, A.G. 2022. Removal of endocrine disrupters from the contaminated environment: Public health concerns, treatment strategies and future perspectives - A review. *Heliyon*. 8(4):e09206. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09206>
- Włodarczyk-Makuła, M. 2024. Selected organic micropollutants in the aquatic environment. *Desalination and Water Treatment*. 317:100061. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100061>
- Xiang, C., Du, Y., Han, W., Guan, B., Liu, H., An, Y., Liu, Y., Jiang, H., Chang, J., Ge, Y. 2024. Proper C/N ratio enhances the effect of plant diversity on nitrogen removal and greenhouse effect mitigation in floating constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31985-z>
- Xiong, R., Li, Y., Gao, X., Li, N., Lou, R., Saeed, L., Huang, J. 2023. Effects of a long-term operation wetland for wastewater treatment on the spatial pattern and function of microbial communities in groundwater. *Environmental Research*. 228:115929. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115929>
- Xu, C., Feng, Y., Li, H., Li, Y., Yao, Y., Wang, J. 2024. Constructed wetlands for mariculture wastewater treatment: From systematic review to improvement measures and insights. *Desalination*. 579:117505. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117505>
- Xu, Z., Zhao, Y., Xu, Z., Chen, X., Zhang, X., Chen, Z., Ban, Y. 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced the drinking water treatment residue-based vertical flow constructed wetlands on the purification of arsenic-containing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 465:133241. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133241>
- Yang, R., Yang, Q. 2023. A review of emerged constructed wetlands based on biochar filler: Wastewater purification and carbon sequestration/greenhouse gas reduction. *Environmental Engineering Research*. 29(2):230105-230100. <https://doi.org/10.4491/eer.2023.105>

-
- Yang, Y., Li, C.-K., Han, L., Yang, Z.-P., Xiao, N.-N., Zhang, N., Dong, Y.-Y., Chen, Z.-W., Xi, H., Wang, W.-D. 2024. Performance assessment of solar photovoltaic-based constructed wetland for sustainable rural wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 59:105068. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105068>
- Youssef, Y.A., Abuarab, M.E., Mahrous, A., Mahmoud, M. 2023. Enhanced degradation of ibuprofen in an integrated constructed wetland-microbial fuel cell: Treatment efficiency, electrochemical characterization, and microbial community dynamics. *RSC Advances*, 13(43), 29809–29818. <https://doi.org/10.1039/d3ra05729a>
- Yu, Y., Wang, S., Yu, P., Wang, D., Hu, B., Zheng, P., Zhang, M. 2024. A bibliometric analysis of emerging contaminants (ECs) (2001–2021): Evolution of hotspots and research trends. *The Science of the Total Environment*. 907(168116). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168116>
- Yusuf, A., Ajibade, F.O., Ajibade, T.F., Ifeoluwa, O.B., Lasisi, K.H., Nwogwu, N.A., Adelodun, B., Kumar, P., Omotade, I.F., Akinbile, C.O. 2024. Fate of organic micropollutants in aquatic environment: Policies and regulatory measures. In *Organic Micropollutants in Aquatic and Terrestrial Environments*. Pp. 331–357. Springer Nature Switzerland.
- Zapata-Morales, A.L., Vega-Rodriguez, S., Alfaro-de-la-Torre, M.C., Hernández-Morales, A., Leyva-Ramos, S., Soria-Guerra, R.E. 2023. Efficiency of cattail to remove a mixture of pharmaceuticals in a constructed wetland. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 67(1):1–11. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v67i1.1848>
- Zhang, F., Wang, J., Li, L., Shen, C., Zhang, S., Zhang, J., Liu, R., Zhao, Y. 2024a. Technologies for performance intensification of floating treatment wetland - An explicit and comprehensive review. *Chemosphere*. 348:140727. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140727>
- Zhang, H., Wang, X.C., Zheng, Y., Dzakpasu, M. 2023. Removal of pharmaceutical active compounds in wastewater by constructed wetlands: Performance and mechanisms. *Journal of Environmental Management*. 325:116478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116478>
- Zhang, J., Yu, X., Ding, S., Zou, Y. 2024b. Lignite-steel slag constructed wetland with multi-functionality and effluent reuse. *Journal of Environmental Management*. 353:120183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120183>