

Artículo de Revisión
Revision Article

APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN CON MACRÓFITAS APPLICATION OF PHYTOREMEDIATION WITH MACROPHYTES

Royer Sthiben Celi Fernández

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad de Ciencias Agropecuarias
Manta, Ecuador.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5490-5276>

Ever Darío Morales Avendaño

Escuela Superior Politécnica de Agropecuaria de Manabí-MFL, Carrera de Ingeniería Ambiental
Calceta, Ecuador.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9006-4996>

Charity Elizabeth Andrade Ruiz

Universidad del Zulia, Departamento de Química
Maracaibo, Venezuela.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5609-2010>

Autor correspondiente: Ever Morales: edmorales@espam.edu.ec

Cómo citar este artículo:

Celi Fernández RS, Morales Avendaño ED, Andrade Ruiz CE. Aplicación de la fitorremediación con macrófitas. Rev. Soc. cient. Parag. 2025;30(2):103-113.

RESUMEN

Las plantas acuáticas tienen gran capacidad para depurar aguas residuales, ya que eliminan contaminantes orgánicos e inorgánicos como nitrógeno y fósforo y regulan la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en simbiosis con bacterias. Estudios han demostrado la factibilidad del uso de esta alternativa para tratamiento de efluentes de manera eficiente mediante diferentes especies de macrófitas capaces de absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes en suelo, aire, agua o sedimentos. La presente revisión tiene como objetivo conformar una integración de información actualizada sobre esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales y sus ventajas como biofiltros; además de comparar diferentes especies con distintos contaminantes y sus mecanismos de depuración, así como, la perspectiva actual y futura del uso de macrófitas, gracias a su rendimiento, eficiencia de remoción, calidad del tratamiento y uso de la biomasa. La consolidación de los avances logrados demuestra que los mecanismos fisicoquímicos de la rizofiltración (*Azolla*, *Eichhornia*, *Lemna*, *Pistia*, *Typha*); fitovolatilización (*Juncus*, *Phragmites*, *Typha*) y fitodegradación de fármacos y detergentes (*Phragmites*, *Spirodela*), continúan sirviendo de modelos fisiocológicos en estudios sobre eficiencia de remoción de metales, organoclorados y contaminantes emergentes a nivel de raíces y hojas en plantas acuáticas. También se destaca la aplicación de la fitorremediación como estrategia para la mitigación de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Aguas residuales; biodegradación; biomasa; metales pesados; plantas acuáticas.

ABSTRACT

Aquatic plants have a great capacity to purify wastewater, since they eliminate organic and inorganic contaminants such as nitrogen and phosphorus and regulate Biological Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD) in symbiosis with bacteria. Studies have demonstrated the feasibility of using this alternative to efficiently treat effluents using different species of macrophytes capable of absorbing, accumulating, metabolizing, volatilizing or stabilizing contaminants in soil, air, water or sediments. The objective of this review is to form an integration of updated information on this technology for wastewater treatment and its advantages as biofilters; in addition to the comparison of different species with different contaminants and its treatment mechanism, as well as the current and future perspective of the use of macrophytes, thanks to their performance, removal efficiency, quality of treatment and use of biomass. The consolidation of the advances achieved demonstrates that the physicochemical mechanisms of rhizofiltration (*Azolla*, *Eichhornia*, *Lemna*, *Pistia*, *Typha*); phytovolatilization (*Juncus*, *Phragmites*, *Typha*) and phytodegradation of drugs and detergents (*Phragmites*, *Spirodela*), will continue to serve as physioecological models in studies on the removal efficiency of metals, organochlorines and emerging contaminants at the root and leaf level in aquatic plants. The application of phytoremediation as a strategy for the mitigation of greenhouse gases is also highlighted.

Keywords: Aquatic plants; biomass; heavy metals; phytoremediation; wastewater.

INTRODUCCIÓN

Los contaminantes presentes en los espacios ambientales son un problema de interés integral, pues involucran impactos nocivos para la biosfera; uno de los principales medios afectados es el agua, que contiene una estructura de gran dinámica que la convierte en un gran transportador de contaminantes; esto junto con la disponibilidad limitada hace que alrededor del 40% de la población mundial se enfrente a escasez de este recurso. Mientras que, las aguas residuales sin tratar continúan siendo gran preocupación ambiental, pues contienen contaminantes de origen orgánico e inorgánico en diferentes concentraciones, que son nocivos y afectan la salud humana y al ecosistema⁽¹⁾.

En las aguas residuales, los contaminantes orgánicos se presentan como carbohidratos, grasas, proteínas, aminoácidos y ácidos volátiles y los contaminantes inorgánicos incluyen sodio, calcio, potasio, magnesio, cloro, azufre, fosfato, bicarbonato, sales de amonio, metales y productos químicos que no son tratados, cuyas concentraciones exceden los límites permisibles para su descarga a los cuerpos receptores que pretenden minimizar el impacto⁽²⁾.

La mayoría de las tecnologías utilizadas en los tratamientos de aguas residuales requieren una gran inversión de capital, lo que representa un obstáculo para el cumplimiento de normativas ambientales en muchas fábricas. Adicionalmente a los grandes costos operativos para la eliminación de los contaminantes, se suma el problema de la disposición de lodos generados en los tratamientos. Los organismos reguladores y las autoridades competentes deberían tomar en cuenta esta situación, promoviendo el uso de tecnologías alternativas ecoamigables y de bajo costo, para el tratamiento adecuado de efluentes⁽³⁾.

La creciente contaminación del agua ha incentivado la búsqueda de alternativas que traten de minimizar el impacto ambiental; en este caso sería la implementación de la tecnología ambiental para conservar el ambiente natural y los recursos, y así frenar los impactos negativos. En este sentido, los humedales artificiales representan una biotecnología útil en el tratamiento de aguas; el cual consiste en el uso de plantas acuáticas en estanques poco profundos, involucrando un proceso microbiano, biológico y fisicoquímico natural como tratamiento⁽⁴⁾.

En estos sistemas, las macrófitas crean un ambiente aireado para la microbiota que contribuye a la disminución de la DBO, DQO, y de compuestos orgánicos; tales como nutrientes, metales, fenoles, colorantes y pesticidas; a través de los mecanismos de distribución de los contaminantes; tales como, la fitoextracción, rizofiltración, fitoestabilización y fitodegradación⁽⁵⁾. Por otra parte, proporcionan un sistema de tratamiento con facilidad de operación y de bajo costo que representa una alternativa de tratamiento, al disminuir los contaminantes de forma considerable. En este sentido, el primer proceso se basa en la absorción, translocación y acumulación de los metales en tallo, hojas y brotes; mientras que, la fitoestabilización, es aplicada en suelos con la finalidad de disminuir la biodisponibilidad y movilidad del contaminante⁽⁶⁾.

Existe una gran variedad de sistemas de fitorremediación que usan plantas flotantes, emergentes, sumergidas y otras con medios de soportes como los humedales. El presente trabajo de revisión integra información actualizada sobre las diferentes especies de plantas acuáticas y sus ventajas en cuanto a sus aplicaciones ambientales en la degradación, estabilización, bioacumulación, volatilización de contaminantes que puede mejorar la eficiencia de los procesos de fitorremediación, y las de reconocer las ventajas, fortalezas y limitaciones de esta. Por lo que, se busca una alternativa ecológica, rentable y eficiente para mejorar la calidad del agua y gestionar los recursos hídricos de forma sostenible. Y de igual manera para dar a conocer la utilidad de su biomasa como materia prima para la producción de abono orgánico.

METODOLOGÍA

Se seleccionó información de artículos de revisión y originales de investigaciones publicados en revistas científicas indexadas en bases de datos Scopus, Latindex, Scielo, Redalyc y repositorios académicos publicados en un 51,89% en inglés y en un 48,11% en español. La metodología se desarrolló en base a un análisis descriptivo de tipo referencial de acuerdo a las diferentes técnicas de revisión de literatura especializada, con una secuencia ordenada a partir de la elección de una base de datos obtenida de fuentes primarias, secundarias y terciarias⁽⁷⁻⁸⁾.

Se realizó la selección de investigaciones basadas en la aplicación de tecnologías de fitorremediación con plantas acuáticas y su capacidad para eliminar contaminantes en aguas residuales de fuentes domésticas e industriales, ya sea que se usen como una planta viva, cultivada en agua o que se utilicen partes de órganos de la planta.

La esquematización de la información se desarrolló en base al hábitat acuático (plantas sumergidas, flotantes y emergentes), de las especies más utilizadas en fitorremediación en las cuales se identifican: el contaminante, utilización de la biomasa, fecha de publicación y además la comparación y descripción de las metodologías aplicadas en cuanto a la depuración de aguas. Así como también, se representan las aplicaciones de la especie flotante *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) por ser la más estudiada y a la que se le ha identificado una mayor diversidad de usos. Por otra parte, se ha realizado una actualización sobre los diferentes mecanismos de fitorremediación; los cuales han contribuido con la elucidación de los cambios, especiaciones y de transferencias de los contaminantes en las macrófitas a nivel mundial. Finalmente, se señalan las perspectivas actuales y retos posibles hacia el futuro.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Plantas utilizadas en fitorremediación

Las especies vegetales acuáticas constituyen la flora hidrófila, en lenguaje científico son macrófitas, emplean la energía solar a través de la fotosíntesis, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales, de modo que colabora en el tratamiento de aguas, ya que su función es la fitodepuración. Estas plantas superiores que escogieron como lugar de vida los humedales, son reconocidas como hidrófitos, macrófitas, macrófitas vasculares, limnófitos y malezas, este último nombre indica el desconocimiento de las características que proporcionan en los cuerpos de agua⁽⁹⁾.

Las especies de plantas ideales para fitorremediación deben ser resistente a plagas y enfermedades, tener un alto potencial para absorber varios contaminantes, crecimiento rápido, sistemas de raíces con capacidades de absorción única y selectiva, fáciles de cultivar y simples de cosechar con alta producción de biomasa, aplicación económica y amigable con el ambiente, tolerantes a los efectos tóxicos de metales y contaminantes y no ser atractivas para a los herbívoros⁽¹⁰⁾.

Para explotar todo su potencial, se necesita una comprensión de cómo la absorción, el transporte y el tráfico de metales o contaminantes a través de las membranas de las plantas y la distribución, tolerancia, sensibilidad, entre otros aspectos, tienen lugar en diferentes entornos. Plantas acuáticas en agua dulce, sistemas marinos y estuarinos, actúan como receptáculos para varios metales y tienen un campo amplio de aplicación en la remediación de metales pesados en el medio ambiente. La absorción y eliminación de contaminantes varía para cada categoría de macrófitas que pueden ser clasificadas en emergentes, flotantes y sumergidas⁽¹¹⁾.

Emergentes: La raíz de estas plantas está adherida a los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie del agua; mientras sus estructuras reproductoras están en la porción aérea de la planta. Entre algunos ejemplos se indican: el carrizo (*Phragmites australis*), la enea (*Typha* sp.) y el lirio amarillo (*Iris pseudacorus*).

Flotantes: Se subdividen en dos grupos: Plantas de libre flotación (no fijadas): Sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua, pero sus raíces no están fijadas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua. Sus estructuras vegetativas se mantienen emergentes y en el caso de sus hojas se mantienen sobre la superficie del agua, y sus raíces no permanecen fijadas en sedimentos. Entre las especies se encuentran: el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), nenúfar (*Nymphaea mexicana*), la lenteja de agua (*Lemna minor*) y el helecho de agua (*Azolla* sp).

Sumergidas: Se desarrollan debajo de la superficie del agua o completamente sumergidas. Un ejemplo de este tipo de plantas es la Elodea (*Elodea canadensis*). En la Tabla 1, se presentan las especies emergentes, flotantes y sumergidas mayormente utilizadas en procesos de fitorremediación.

Tabla 1. Características de las plantas acuáticas mayormente utilizadas en fitorremediación según su hábitat.

Géneros de Macrófitas	Características
Emergentes <i>Phragmites, Typha</i> <i>Cyperus, Scirpus, Alocasia</i> <i>Schoenoplectus, Vetiver</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mejoran los niveles de oxígeno disuelto; retienen la materia orgánica y metales pesados. Su crecimiento competitivo evita la proliferación de otras especies invasoras. Remoción de contaminantes de suelos, debido al desarrollo del sistema radicular. Contribuyen al resguardo de fauna acuática y de aves⁽¹²⁾.
Flotantes <i>Lemna, Nymphaea,</i> <i>Eichhornia, Pistia</i> <i>Salvinia, Azolla, Hydrocotyle</i>	<ul style="list-style-type: none"> El desarrollo de sus raíces permite su capacidad fitorremediadora, para la rizofiltración y fitoacumulación. Regulan el crecimiento de vegetales y de algas, por la competencia de los nutrientes⁽¹³⁾.
Sumergidas <i>Elodea, Ceratophyllum,</i> <i>Potamogeton, Posidonia,</i> <i>Zostera, Vallisneria, Hydrilla</i>	<ul style="list-style-type: none"> Con capacidad para incrementar el oxígeno disuelto y reducir la turbidez del agua. Pueden provocar adherencia de sólidos disueltos y la filtración de contaminantes. Contribuyen como fuente de alimento y hábitat de especies acuáticas. Degradación y reciclaje de nutrientes⁽¹⁴⁾.

Como se muestra en la figura 1, las especies de plantas acuáticas flotantes han sido las mayormente estudiadas en los últimos cinco años, siendo *Eichhornia crassipes*, la de mayor porcentaje de estudio. Esto debido a la alta eficiencia y adaptabilidad que tiene en aguas con alto contenido de contaminantes, el resto de las plantas tienen menor campo de investigación debido a la poca adaptabilidad a nuevos ambientes⁽¹⁵⁾.

Eichhornia resalta por su efectividad fitorremediadora; a pesar de ser considerada una maleza invasora, debido a su elevada velocidad de crecimiento al captar concentraciones significativas de contaminantes. Esta planta está siendo utilizada para diversas aplicaciones e investigaciones sobre fitorremediación y se podría utilizar en la producción de biocombustibles por su alto contenido de celulosa en su biomasa, brindando la optimización de recursos completa⁽¹⁶⁾.

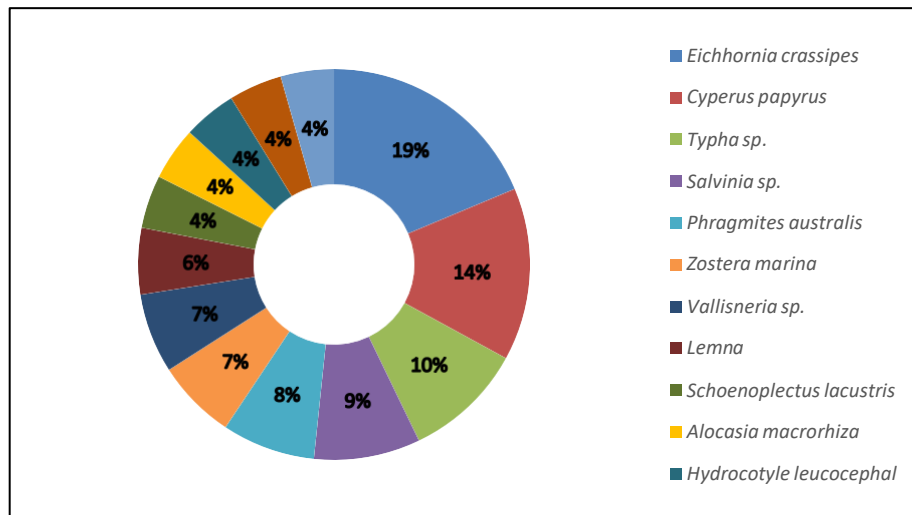


Figura 1. Estudios de especies de macrófitas más utilizadas en fitorremediación de aguas contaminadas desde 2018.

En el caso de las especies emergentes predominan las investigaciones realizadas con *Cyperus papyrus*, seguida de *Typha domingensis*. Estas plantas son implementadas en la conformación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales⁽¹⁷⁾. Entre las especies sumergidas, *Zostera marina* ha sido la más estudiada, demostrando su potencial uso como bioindicadora de la contaminación por metales, dado que en experimentos donde se transplantaron brotes de esta especie en bahías con sedimentos contaminados con metales, se determinó su potencial fitorremediador al acumular una gran cantidad de Co, Zn, Pb y Hg en sus tejidos⁽¹⁸⁾.

Eventualmente en los “humedales” se desarrollan organismos adaptados a las condiciones de inundaciones en los cuales las macrófitas desarrollan ciertos procesos físicoquímicos relacionados con la depuración el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, nutrientes y productos tóxicos⁽¹⁹⁾. Sin embargo, algunas pueden involucrar mecanismos internos con adaptaciones para la tolerancia a altas concentraciones de metales⁽²⁰⁾. Los materiales lignocelulósicos conformados por celulosa, hemicelulosa y lignina son los principales responsables de la adsorción de los iones metálicos debido a su elevada afinidad por los grupos: sulfhidrilo, amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo y cuyos ligandos corresponden a aminoácidos, ácidos orgánicos y fitoquelatinas⁽²¹⁾.

Estrategias fisicoquímicas en macrófitas con capacidades de remoción de metales

Se ha demostrado que muchas especies han tenido éxito en la absorción de contaminantes tales como el Pb, Cd, Cr, As y diversos radionucleidos; además de presentar la capacidad de absorción de metales; tales como Fe, Mn, Zn, Cu, Mg, Mo y Ni; y de algunos metales con función biológica desconocida⁽²²⁾. La capacidad de absorción de las raíces de las plantas, junto con los procesos de la translocación, bioacumulación y degradación de los contaminantes son características de cada especie por las formas físicas y como captan a los contaminantes⁽²³⁾.

Entre los mecanismos involucrados en la remediación de los contaminantes del agua, especialmente los contaminantes metálicos, se incluyen: fitoestabilización, fitofiltración o rizofiltración, fitoextracción/fitoacumulación, fitodegradación y fitovolatilización, siendo descritos en *Pistia estratiotes* para la remoción de metales pesados (Figura 2).

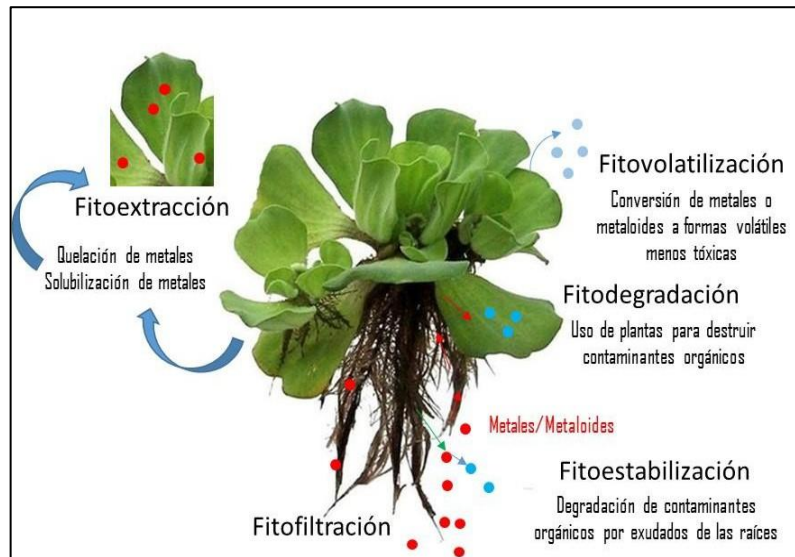


Figura 2. Mecanismos fisicoquímicos empleados por *Pistia estratiotes* para la remoción de metales pesados.

La fitoextracción/fitoacumulación, implica la absorción de metales tóxicos por las raíces de las plantas, seguida de la translocación a los brotes y la deposición en la vacuola, la pared celular, la membrana celular y otras partes metabólicamente inactivas en los tejidos vegetales. Los mecanismos generales durante la acumulación de tóxicos incluyen la absorción de cationes metálicos, seguida de la formación de un complejo metal-fitoquelatina (M-PC) o un complejo metal-ligando dentro de la célula, después de formar la M-PC, estas moléculas complejas se trasladan a la vacuola y se almacenan⁽²⁴⁾.

La fitoestabilización, es un mecanismo que opera mediante la inmovilización de compuestos contaminantes en la rizósfera. Al exponerse a los metales, las plantas los inmovilizan ya sea por la absorción de las raíces o modificando los iones metálicos. Una variedad de exudados de raíces, como ácidos orgánicos y aminoácidos, actúan como un ligando de metales para formar complejos estables en la rizósfera. Algunos exudados cambian el pH de la rizósfera, lo que conduce a la precipitación de metales, limitando su biodisponibilidad y disminuyendo la toxicidad. Así mismo, el glutatión, conjuga los contaminantes orgánicos y desintoxica sus efectos⁽²⁵⁾.

La rizofiltración, implica la eliminación de sustancias tóxicas utilizando las raíces en aguas saturadas de contaminantes, por medio de la adsorción, concentración y precipitación de los metales sobre raíces u órganos sumergidos. Este método es eficaz para la remediación de suelos y aguas contaminados con nutrientes⁽²⁶⁾. Las plantas utilizadas se cultivan hidropónicamente en agua limpia para desarrollar un gran sistema de raíces; luego, son aclimatadas con agua contaminada para ser trasladadas al sitio afectado. En las especies que utilizan este mecanismo han sido *Eichhornia crassipes* en la remoción de Fe, Cr, Cu, Cd, Zn, Ni, As⁽²⁷⁾, *Azolla caroliniana* para As⁽²⁸⁾, *Lemna minor* en Uranio⁽²⁹⁾ y *Typha angustifolia* para Cu, Pb, Ni, Fe, Mn y Zn⁽³⁰⁾.

En la fitovolatilización, las plantas toman contaminantes del suelo y los transforman en compuestos químicos con formas más volátiles para luego ser liberados a la atmósfera mediante volatilización, y siendo esto eficiente cuando los contaminantes volatilizados están en bajas concentraciones. Durante el proceso algunos compuestos pueden volatilizarse directamente del tallo y las hojas; mientras que, otros pueden sublimarse debido a la interacción raíz-suelo. En este caso, se ha reportado a *Phragmites australis* para la remoción de Organoclorados (OCs), con lo cual, durante el proceso el 1,4-diclorobenceno (DCB), 1,2,4-triclorobenceno (TCB) y el γ -hexaclorociclohexano (γ HCH) se vaporizan, por lo que la volatilidad de los OCs afecta la translocación de raíces a brotes⁽³¹⁾.

En el caso de la fitodegradación, se permite que contaminantes orgánicos como pesticidas puedan ser removidos del medio a través de la degradación o transformación de la planta. Esto ocurre cuando se absorben los contaminantes y los metaboliza degradándolos en compuestos menos nocivos y los distribuye a nivel del tejido vegetal. *Pistia* también ha demostrado la utilización de la fitoacumulación y la rizodegradación durante la eliminación de perclorato con un 18,2% y 45,68%; respectivamente en 7 días⁽³²⁾.

Sistemas de fitorremediación con plantas acuáticas

El proceso de fitorremediación se logra utilizando tanto técnicas *in situ* como *ex situ*, siendo la de *in situ* la más utilizada; ya que disminuye la proliferación de contaminantes en el suelo, agua y desechos transportados por el aire. Entre las principales aplicaciones reportadas de estos sistemas han sido para el tratamiento de aguas pluviales, residuales, sistemas combinados y efluentes de industria minera, avícola, y porcina⁽³³⁾.

En cuanto a las especies más utilizadas destacan: *Pragmites*, *Typha* y *Cyperus* (emergentes); *Lemna*, *Eichhornia*, *Pistia*, *Salvinia* y *Azolla* (flotantes) y *Elodea*, *Ceratophyllum* y *Potamogeton*, entre las sumergidas⁽³⁴⁾. De acuerdo a la consolidación de la revisión se demuestra que los mecanismos fisicoquímicos de Rizofiltración (*Azolla*, *Eichhornia*, *Lemna*, *Typha*); Fitovolatilización (*Juncus*, *Phragmites*, *Typha*) y Fitodegradación de fármacos y detergentes (*Phragmites*, *Spirodela*) constituyen las más relevantes en estas especies de macrófitas, por lo que servirán de modelos para experimentos sobre la eficacia de remoción de metales y de organoclorados a nivel de raíces y hojas⁽³⁵⁾.

Se confirma que, una de las especies más estudiadas corresponde a *Eichhornia crassipes*, debido a sus características y aplicaciones depuradoras, facilidad de proliferación, especialmente en regiones tropicales y subtropicales. Esta planta obtiene del agua todos los nutrientes que requiere para su metabolismo⁽³⁶⁾, y se caracteriza por poseer un sistema de raíces con microorganismos asociados que favorece la acción depuradora. También se destaca como una excelente bioacumuladora de Cd, Ni, Cu, Zn, Cr, Pb⁽³⁷⁾ (Figura 3). Otras como *Salvinia* demostraron una gran eficiencia en el tratamiento de Pb, Cr, Ni, Cd⁽³⁸⁾; así mismo; *Pistia stratiotes* presenta una alta capacidad en el tratamiento de efluentes industriales con varios metales entre los que se encuentran Pb, Cr, Cu, Co, Cd al igual que especies de Lemnaceas⁽³⁹⁾. Para el caso de una valorización de plantas acuáticas más estudiadas se ha reportado a *Typha*, *Cyperus* y *Phragmites*, a las cuales se les ha detectado también la capacidad de bioacumular Cu, Cd y Cr⁽³⁷⁾.

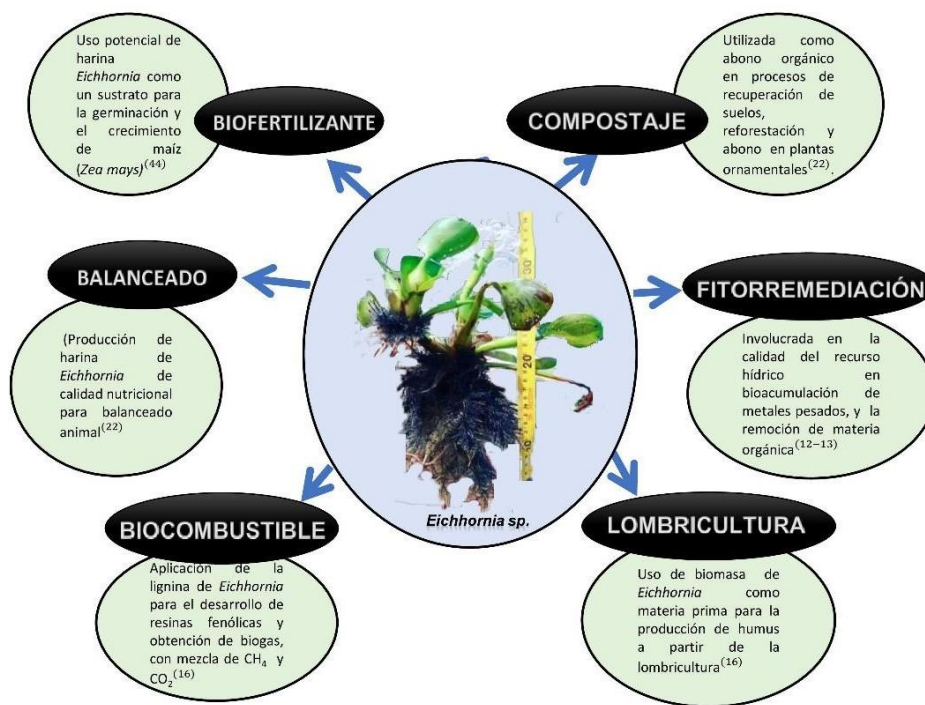













Figura 3. Aplicaciones de *Eichhornia crassipes*.

Uso potencial de la biomasa de macrófitas utilizadas en fitorremediación

La biomasa generada en conexión con el tratamiento de aguas residuales presenta un uso potencial como biofertilizante, compostaje, producción de alimentos balanceados para animales, biocombustibles o lombricultura. Ciertas plantas acumulan altas concentraciones de metales, lo que depende de la composición del medio donde se encuentre (Tabla 2). La biomasa de estas plantas no se aprovecha de manera sostenible en la actualidad, un ejemplo de esto es la de *Eichhornia* y de *Typha*, que presentan una reproducción directamente relacionada con el nivel de contaminación o concentración de nutrientes en el medio⁽¹⁶⁾.

Tabla 2: Registro de resultados obtenidos en investigaciones con macrófitas (2018-2024).

Especies flotantes	Aportes de la investigación	Imagen
1. <i>Salvinia</i> sp	En presencia de efluentes de industria de papel, redujo la DBO, Zn, Fe, Ni Mg, P e incrementó el OD. Especies más estudiadas: <i>S. auriculata</i> , <i>S. cucullata</i> y <i>S. minima</i> ⁽⁴⁰⁾ .	
2. <i>Azolla</i> sp	Demostró remoción de Pb en agua contaminada con 25, 50 y 75 ppm. <i>A. filiculoides</i> presentó efectividad en biorremediación de un efluente y como sorbente del colorante, rojo Congo(CR9) ⁽³¹⁾ .	
3. <i>Lemna minor</i>	La remoción de N y P en humedal, demostró actividad para fitorremediación. También es Indicadora de aguas eutrofizadas y su crecimiento es modulado por el pH ⁽⁴¹⁾ .	
4. <i>Pistia stratiotes</i>	Especie con elevada capacidad de remoción de metales (Cd, Cr, Pb), de fitoacumulación y translocación de metales Cr(III) y Cr(VI) de raíces a hojas ⁽²³⁾ .	
5. <i>Eichhornia crassipes</i>	Esta especie es la más estudiada por su elevada capacidad de remoción de metales (Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, Zn, Cr) y nutrientes (N,P) y además, de ser efectiva en fitoacumulación y translocación de Cr(III) y Cr(VI) ⁽²³⁾ .	
6. <i>Zostera marina</i>	Especie bioindicadora de metales pesados en costas marinas. Se determinó correlación del contenido de Co, Zn, Pb y Hg, en <i>Z. marina</i> y en sedimentos ⁽¹⁸⁾ .	
7. <i>Hydrilla verticillata</i> (Elodea)	La planta expuesta a 0,05 y 0,1 mg de Cu, induce una mayor acumulación en las hojas maduras y es propuesta para procesos de rizofiltración e hiperacumulación de Fe, Ni, Cd, Cr, Hg, Pb ⁽³¹⁾ .	
Especies emergentes		
8. <i>Schoeno-plectus lacustris</i> (<i>Scirpus lacustris</i>)	Utilizada en humedal de flujo subsuperficial para fitorremediación de agua residual municipal ⁽⁴²⁾ .	
9. <i>Phragmites australis</i>	Capacidad de absorber contaminantes y remoción de N, P, B, Cr ⁽⁴³⁾ .	
10. <i>Typha domingensis</i>	Remediadora de aguas contaminadas con diferentes metales pesados y para remoción de SST, DBO, DQO, N y P ⁽²²⁻⁴⁶⁾ .	
11. <i>Canna generalis</i>	Hiperacumuladora con elevado potencial para fitorremediación de aguas residuales industriales y de remoción de Pb en aguas residuales y suelos ⁽²²⁻⁴⁵⁾ .	

CONCLUSIONES

Entre los mecanismos fisicoquímicos de la fitorremediación más relevantes en plantas acuáticas se destacan la rizofiltración, fitovolatilización y fitodegradación, contribuyendo a la delimitación de estrategias fisicoquímicas que permitan la evaluación de modelos experimentales y considerando la inclusión de agentes quelantes naturales, procesos de aireación e intervención de microorganismos asociados a la rizósfera a fin de favorecer a la reducción efectiva de contaminantes en humedales artificiales, lagunas de fitorremediación y plantas de tratamiento de aguas.

Los estudios realizados hasta el presente continúan demostrando las capacidades ecofisiológicas de *Eichhornia* sp., *Typha* sp., *Juncus* sp., como las más adecuadas para la remoción de diversos contaminantes y presentar mecanismos diversos de fitorremediación. No obstante, se debe continuar, valorando el uso de su biomasa como materia prima para la obtención de bioproductos de interés agroindustrial y agroecológico para la producción de abono orgánico siempre y cuando los niveles de metales pesados se presenten en los niveles permisibles.

Declaración de financiamiento:	Los autores declaran que no recibieron financiación externa.
Declaración de conflicto de intereses:	Los autores declaran no tener conflictos de intereses.
Declaración de autores:	Los autores aprueban la versión final del artículo.
Contribución de autores:	RSCF, CEAR Y EDMA han trabajado en la revisión de literatura, recolección de datos, análisis de resultados, redacción del manuscrito y elaboración de tablas y figuras
Revisión por pares:	Este artículo fue evaluado mediante un proceso de revisión por pares anónimos, conforme al procedimiento de transparencia editorial de la revista. Las observaciones y sugerencias de los revisores fueron consideradas por los autores hasta alcanzar la versión final publicada, garantizando la integridad científica del trabajo y la confidencialidad de los evaluadores.
Disponibilidad de datos:	Los datos están disponibles previa solicitud al autor corresponsal.

REFERENCIAS

1. Banco Mundial. Agua Residual: De Residuo a Recurso. Indicadores de Desarrollo Mundial. 2020. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>
2. Manchaca S. Las actividades humanas y el agua. Universidad Veracruzana. 2022. Disponible en: <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/lasactividadeshumanasyelagua/#::~:~:text=Los%20principales%20componentes%20que%20contaminan,bosques%20madereros%20y%20tala%20inmoderada>
3. UNESCO. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Prevención y reducción de la generación de aguas residuales y de las cargas de contaminación en la fuente. Paris: UNESCO; 2017. Disponible en: <https://www.unesco.org/en/wwap>
4. Jiménez, J. *Eichhornia crassipes* y su uso en técnicas de aprovechamiento y fitorremediación de cuerpos de agua. 2021. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40340>
5. Shah V, Daverey A. Fitorremediación: un enfoque multidisciplinario para la limpieza de suelos contaminados con metales pesados. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;18:100774. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>
6. Rosas J, Iannacone J, Rosas J, Iannacone J. Bioacumulación de elementos potencialmente tóxicos (Ept) por *sarcocornia neei* en un humedal costero del Perú. *Ciencia del suelo*. 2020;38(2):343-54. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672020000200343&lng=es&tling=en
7. Redondo I. ¿Cómo elaborar un artículo de revisión?. *Graffías Disciplinarias de la UCP*. 2017;37:1-28. Doi: <https://doi.org/10.31908/grafias.v0i37.1210>
8. Gómez L. Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. 2019. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49630405022.pdf>
9. Mendoza Y, Pérez J, Galindo A. Evaluation of the Contribution of the Aquatic Plants *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* in the Municipal Wastewater Treatment. *Información tecnológica*. 2018;29(2):205-214. Doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200205>

10. Olguín EJ, Hernández E, Ramos I. Efecto de diferentes condiciones de luz y del pH en la capacidad de *Salvinia minima* Baker para eliminar cadmio, plomo y cromo. Acta Biotechnol. 2002;22(1-2):121-31. Doi: [https://doi.org/10.1002/1521-3846\(200205\)22:1/2%3C121::AID-ABIO121%3E3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1521-3846(200205)22:1/2%3C121::AID-ABIO121%3E3.0.CO;2-F)
11. Shmaefsky B. Phytoremediation. Concepts and strategies in plant sciences. Springer, Cham. 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00099-8>
12. García F, Patiño J, Zhinin F, Donoso S. Performance of *Phragmites australis* and *Cyperus papyrus* in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. International Soil and Water Conservation. 2019;7(3):286-296. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.04.001>
13. Campos J, Queiroz S, Roston D. Removal of the endocrine disruptors ethinyl estradiol, bisphenol A, and levonorgestrel by subsurface constructed wetlands. Science of The Total Environment. 2019;693:133514. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31369896/>
14. Vasarri M, De Biasi A, Barletta E, Pretti C, Degl'Innocenti D. An Overview of New Insights into the Benefits of the Seagrass *Posidonia oceánica* for Human Health. Mar. Drugs. 2021;19:476. Doi: <https://doi.org/10.3390/md19090476>
15. Espinoza-Acosta JL, Montaña-Leyva B, Valencia-Rivera DE, Ledesma-Osuna AI, Vega-Ríos A. Extracción, caracterización y actividad antioxidante de lignina de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y cáscara de nuez pecanera (*Carya illinoensis*). BIOTECNIA. 2022;24(2):94-103. Disponible en: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i2.1642>
16. Carreño UF. Desarrollo de un sistema sostenible de fitorremediación y bioetanol con *E. crassipes*. Instituto mexicano de tecnología de agua. Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria los Libertadores, Bogotá, Colombia. 2021;12(4). Disponible en: <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1837>
17. Quevedo A. Diseño y construcción de humedal artificial para la recuperación de aguas residuales en la población de Alcalá. Rev.Cien.Tec.In. 2021;19(24). Doi: <https://doi.org/10.56469/rcti.v19i24.476>
18. Lee G, Suonan Z, Hyeon S. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass *Zostera marina* in the polluted bay systems. Marine Pollution Bulletin. 2019;149. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110509>
19. Nuevo D. Humedales artificiales en depuración de agua residual. Ingeniería de Aguas. 2023;22. Disponible en: <https://www.tecpa.es/humedales-artificiales-en-depuracion-de-agua-residual/>
20. Nuñez M. Aplicación de técnicas de fitorremediación en suelos contaminados con plomo y cadmio. Conciencia Digital. 2022;1(5):6-25. Doi: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i1.3.2089>
21. Machín Suárez A, Chávez Sánchez E, Héctor Ardisana E, Santos Cervantes M, Pérez Álvarez S. Actividad de enzimas del estrés oxidativo en plantas de tomate cv. Amalia en respuesta al plomo. Horticultura Brasileira. 2017;35:216-223. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/hb/a/qmw8RXLxqgy4BNKvYFcVK3m/abstract/?lang=es>
22. Vera A, Ramos K, Camargo E, Andrade C, Núñez N, Delgado J, Cárdenas C, Morales E. Phytoremediation of wastewater with high lead content and using *Typha domingensis* and *Canna generalis*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 2017;39(2):88-95. Disponible en: <https://vufind-ceipa.metacatalogo.com/Record/ojs-redalyc-605767268004>
23. Andrade C, Cáceres A, Vera A, Araujo G, Morales E. Fitoacumulación y translocación de cromo en *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* durante el tratamiento de efluentes contaminados. Revista Técnica. 2019;43(1):26. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/6057/605764200006/html/>
24. Lajayer B, Moghdam N, Maghsoodi M, Ghorbanpour M, Kariman K. Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. Environ.Sci.Pollut.Res. 2019;26:8468-8484. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30712209/>
25. Hussain S, Siddique T, Arshad M, Saleem M. Bioremediation and phytoremediation of pesticides: recent advances. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2019; 39:843-907. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380801910090>
26. Banerjee A, Roychoudhury A. Rhizofiltration of combined arsenic-fluoride or lead-fluoride polluted water using common aquatic plants and use of the 'clean' water for alleviating combined xenobiotic toxicity in a sensitive rice variety. Environmental Pollution. 2022; 304:119128. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119128>
27. Ruiz A, Quintero K, González M, Arcila B. Bacterias nitrificantes y desnitrificantes asociadas a la rizosfera y a la biopelícula formada en humedales artificiales de flujo subsuperficial y flujo superficial. Revista científica de la facultad de ingeniería. 2019;11:22-154. Disponible en: <https://doi.org/10.53995/20278101.805>
28. Yan A, Wang Y, Ngin S, Mohd M, Ghosh S, Chen Z. REVIEW article Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. Plant Biotechnology. 2020;11. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
29. Rai PK. Heavy metals/metalloids remediation from wastewater using free floating macrophytes of a natural wetland. Environ.Technol.Innov. 2019; 15:100393. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100393>
30. Favas P, Pratas J, Prasad M. Accumulation of arsenic by aquatic plants in large-scale field conditions: opportunities for phytoremediation and bioindication. Sci. Total Environ. 2012;433:390-397. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22820614/>

31. Chandra V. Phytoremediation of heavy metals fly ash pond Azolla caroliniana. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022;82(1):8-12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.002>
32. Li H, Sheng G, Sheng W, Xu O. Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass. *Chemosphere*. 2022;48:335–341. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00093-0)
33. de Souza M, Lytle C, Mulholland M, Otte M, Terry N. Selenium assimilation and volatilization from dimethyl selenio propionate by Indian mustard. *Plant Physiol*. 2020; 122:1281–1288. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10759525/>
34. San Miguel A, Ravanel P, Raveton M. A comparative study on the uptake and translocation of organochlorines by *Phragmites australis*. *J. Hazard. Mater*. 2013; 244:60–69. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.025>
35. Bhaskaran K, Vijaya A, Tumbath S, Babu L, Gangadharan P. Phytoremediation of perchlorate by free floating macrophytes. *Journal of Hazardous Materials*. 2023;260(15):901-906. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23872336/>
36. Martelo J, Lara J. Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*. 2012;8(15):221–243. Disponible en: https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652012000100011
37. Carrión C, Ponce C, Cram S, Sommer I, Hernández M, Vanegas C. Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*. 2012;46(6):609-620. Disponible en: <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/980>
38. De La Fournière E, Vega N, Müller N, Pizarro R, Debray M. Determinación del Mercurio en tejidos vegetales por MicroPIXE: Aplicación al estudio de la hiperacumulación por *Spirodela intermedia* (Lemnaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 2019;54(2):263-75. Doi: <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v54.n2.24373>
39. Pandey D, Chhimwal M, Srivastava R. A Review on the application of Macrophytes in Phytoremediation of Heavy metal Polluted water. *RJ of Chemistry and Environment*. 2022;26(3):116-105. Disponible en: <https://doi.org/10.25303/2603rice116125>
40. Sánchez G, Melo F. Potencial de las plantas acuáticas. *Crónica y el Portal Comunicación Veracruzana*. 2022. Disponible en: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1752-potencial-de-las-plantas-acuaticas>
41. Ildelfonso Rivera D, Hernando Blotte A, Iannacone H. Efecto tóxico del antipsicótico haloperidol sobre *Lemna minor* (griff,1851) (liliopsida,lemnaceae) y *Daphnia magna* (straus,1820) (cladocera,daphniidae). *Biologist*. 2022;20(1):75–83. Doi: <https://doi.org/10.24039/rtb20222011317>
42. Pérez Y, García D. Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*. 2022;31(1):2279. Doi: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
43. Aminsharei F, Borghei S, Arjomandi R, Nouri J, Pendashteh A. Effects of various plants on treatment efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands based on the hydraulic retention time. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2019;18(6):1201-1206. Doi: <https://eemj.eu/index.php/EEMJ/article/view/3881>
44. Kola E, Munyai, C, Dalu, T. A review of macrophyte phytoremediation in Africa: current research and challenges. *Chemistry and Ecology*. 2025;1–19. Doi: <https://doi.org/10.1080/02757540.2025.2470315>
45. Majeed LR, Sharma D, Rautela K. Sustainable agriculture, aquaculture and phytoremediation through freshwater macrophytes: a comprehensive review of mineral uptake, soil health, and water quality dynamics. *Discov Water*. 2025;5(1). Doi: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00188-5>
46. Samudio Oggero A, Nakayama HD, Ávalos CR, Cantero García I, Benítez JV, Ayala J, Elkhaili R, Peralta I. Eficiencia de la absorción de cobre (Cu) y cromo (Cr), una propuesta de fitorremediación de efluentes mediada por *Typha domingensis*. *Rev. Soc. cient. Parag*. 2021;26(2):100-113. Doi: <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.2.100>