Revista de I+D TECNOLÓGICO
Portal de revistas: http://revistas.utp.ac.pa

Evaluación de la remoción de cobre en macrófitas: *Hydrocotyle bonariensis, Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*

Evaluation of copper removañ in macrophytes: *Hydrocotyle bonariensis, Eichhornia crassipes and Lemna minor*

Alberto Lizondro[1], *Ariel Solis*[1], *Viccelda Domínguez* [2]

[1] Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, [2] Departamento de Hidráulica, Sanitaria y Ciencias Ambientales, [3] Grupo de Investigación en Gestión Integral de Residuos (GIGIR)

***Autor de correspondencia:** viccelda.dominguez@utp.c.pa

RESUMEN. La contaminación de cuerpos de agua por cobre, proveniente de actividades mineras, industriales y agrícolas, representa un riesgo para la salud humana y los ecosistemas debido a su alta capacidad de bioacumulación. El presente trabajo investigativo consistió en el análisis de tres plantas macrófitas, camalote (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna minor*) y redonda de agua (*Hydrocotyle bonariensis*). El estudio se desarrolló en dos fases, en la primera fase se determinó la capacidad de remoción de cobre de las tres plantas de forma individual, para determinar la planta con mayor remoción del metal cobre, teniendo una concentración inicial teórica de 30 mg/L de Cu, dando una remoción de 30% para redonda de agua (*Hydrocotyle bonariensis*), 40% para lenteja de agua (*Lemna minor*) y 68.17% para camalote (*Eichhornia crassipes*). Consiguiente, la segunda fase se evaluó la planta de mayor capacidad de remoción, siendo el camalote (*Eichhornia crassipes*), dónde se analizó su comportamiento frente a distintas concentraciones teóricas experimentales de 30,60,90 y 120 mg/L, dando una remoción del 46%, 63%, 40% y 57% respectivamente a cada concentración.
Se concluye que el uso de plantas macrófitas para fines de fitorremediación es eficaz debido a su alta capacidad de consumo que presentan las plantas frente a los metales pesados, macro y micronutrientes.

Palabras clave. Absorción, cobre, consumo, fitorremediación, macrófitas, plantas

ABSTRACT. Copper contamination of water bodies from mining, industrial and agricultural activities pose a risk to human health and ecosystems due to their high capacity for bioaccumulation. The present research work consisted of the analysis of three macrophyte plants, camalote (*Eichhornia crassipes*), water lentil (*Lemna minor*) and round water (*Hydrocotyle bonariensis*). The study was carried out in two phases, in the first phase the copper removal capacity of the three plants was determined individually, to determine the plant with the highest copper metal removal, having an initial theoretical concentration of 30 mg/L of Cu, giving a removal of 30% for round water (*Hydrocotyle bonariensis*), 40% for water lentil (*Lemna minor*) and 68.17% for camalote (*Eichhornia crassipes*). consequently, the second phase evaluated the plant with the highest removal capacity, being camalote (*Eichhornia crassipes*), where its behavior was evaluated against different theoretical experimental concentrations of 30,60,90 and 120 mg/L, giving a removal of 46%, 63%, 40% and 57% respectively at each concentration. It is concluded that the use of macrophyte plants for phytoremediation purposes is effective due to their high consumption capacity against heavy metals, macro and micronutrients.

Keywords. Absorption Copper, consumption, phytoremediation, macrophytes, plants

1. Introducción

La contaminación hídrica por cobre podría significar un riesgo para las aguas superficiales y subterráneas, debido a descargas residuales de actividades mineras, uso de pesticidas con compuestos de cobre o sistemas de cañerías de descargas industriales

Citación: A. Lizondro, A. Solis y V. Domínguez, "Evaluación de la remoción de cobre en macrófitas: Hydrocotyle bonariensis, Eichhornia crassipes y Lemna minor", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 2, no. 2, pp. (0), 2026.
Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 1 de mayo de 2025. **Recibido con correcciones:** 26 de mayo de 2026. **Aceptado:** 3 de septiembre de 2026.
DOI.
Copyright: 2026. Lizondro, A. Solis y V. Domínguez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

[1]. Una de las fuentes emisoras de contaminación son los lixiviados, producto de la percolación del agua con los desechos sólidos, donde la infiltración de precipitaciones y las migraciones de agua a través de los vertederos municipales, traen consigo sustancias químicas orgánicas tóxicas o indeseables [2].

En Panamá existen decretos que regulan la calidad del agua en ríos. Los principales son el Decreto Ejecutivo No. 75 del 4 de junio de 2008 y el Decreto Ejecutivo No. 479 de 23 de abril de 2013. Panamá también cuenta con otras leyes y reglamentos que contribuyen a la protección de la calidad del agua en ríos, como la Ley General de Ambiente (Ley No. 41 de 1 de julio de 1998), el Código Sanitario (Decreto Ley No. 66 de 10 de noviembre de 1947), Reglamento DGNTI-COPANIT 35-2019 : Descarga de efluentes líquidos a cuerpos y masas de aguas continentales y marinas, Reglamento DGNTI-COPANIT 39-2023 : Descarga de efluentes líquidos directamente a sistemas de recolección de aguas residuales, Reglamento DGNTI-COPANIT 24-99 : Reutilización de las aguas residuales tratadas y el Reglamento DGNTI-COPANIT 47-2000 : Usos y disposición final de lodos. Estas normativas establecen estándares necesarios para limitar la presencia de contaminantes en los cuerpos de agua, contribuyendo así a la preservación de la calidad ambiental.

Para este tipo de problemas, se diseñan metodologías de remediación del agua contaminada por metales pesados, una de estas es la fitorremediación, siendo una ecotecnología basada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes, que en la actualidad está siendo aplicada en diversos países para recuperar suelos contaminados tanto con compuestos orgánicos como inorgánicos. Frente a las tradicionales técnicas fisicoquímicas, la fitorremediación presenta diversas ventajas entre las que se puede destacar su menor coste económico, su aproximación más respetuosa con los procesos ecológicos del ecosistema edáfico, y el hecho de ser una tecnología social, estética y ambientalmente más aceptada [3].

La principal causa de la falta de tratamiento de aguas contaminadas por cobre en Panamá es la falta de recursos financieros y técnicos. La industria minera es una de las principales fuentes de contaminación por cobre en Panamá [4]. Sin embargo, las empresas mineras carecen de una supervisión adecuada en temas de agua, residuos sólidos y planes de emergencia [5]. Además, la carencia de recursos de las autoridades impide el cumplimiento eficiente de las regulaciones ambientales.

Los tratamientos de aguas residuales que involucran macrófitas han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio [6]. En sistemas tropicales estas plantas son consideradas malezas acuáticas. Por otra parte, especies como el camalote son empleados en tratamientos de aguas residuales o efluentes industriales a nivel mundial. También constituyen buenos indicadores en monitoreo de la contaminación con metales [7].

No obstante, aunque se dispone actualmente de amplias reservas de cobre, respaldadas por su alta capacidad de reciclaje y su importancia estratégica en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [8], el creciente ritmo de extracción y consumo plantea nuevos desafíos. El aumento de las actividades mineras asociadas a la explotación de este recurso intensifica la presión sobre los ecosistemas, especialmente en aquellos países donde las regulaciones ambientales resultan insuficientes o carecen de una aplicación efectiva.

Además de su impacto ambiental, la exposición excesiva al cobre puede representar un riesgo para la salud humana. De acuerdo con el biotecnólogo Daniel Pellicer, este metal es esencial para el funcionamiento de enzimas y procesos fisiológicos. Su exceso se ha asociado con enfermedades como el síndrome de Menkes o trastornos que dificultan la absorción de nutrientes como la celiaquía, y trastornos del sistema inmunológico (Pellicer, 2024). Si la cantidad ingerida supera la capacidad del cuerpo para metabolizarla y excretarla, puede producirse una acumulación tóxica que derive en un cuadro de intoxicación por cobre [9]. La inhalación de 0.1 mg/L de vapores de cobre en el aire se considera un peligro para la vida, la ingesta de más de 250 mg de sulfato de cobre puede causar vómitos, lesiones hepáticas y renales, y el consumo mayor de 1.3 mg/L en agua puede causar daños hepáticos o complicaciones como la enfermedad de Wilson [10].

La presencia de este metal en los suelos puede reducir tanto la biomasa como la actividad metabólica de las bacterias, lo que afecta negativamente los procesos biogeoquímicos en los que estos microorganismos intervienen. Como consecuencia, se produce una disminución en la fertilidad de los suelos agrícolas, generando daños significativos en los ecosistemas [11].

El cobre representa un efecto significativo en los ecosistemas acuáticos, debido a que altas concentraciones pueden llegar a inhibir la fotosíntesis y reducir la comunidad de fitoplancton [12]. Dentro de la actividad minera, las tinas de lixiviación pueden variar dependiendo a la eficiencia del proceso, generalmente las concentraciones oscilan entre 1.5 y 3.5 g/L de cobre [13].

Uno de los ejemplos más representativos del impacto ambiental que puede generar el cobre, es el desastre ocurrido en México en el año 2014, dónde la rotura de un dique de contención provocó el derrame de 40.000 metros cúbicos de aguas contaminadas de solución de sulfato de cobre acidulado. Este incidente afectó gravemente a los ecosistemas circundantes, cuyas aguas dependen las comunidades locales. Después de 10 años todavía se siguen notando sus efectos y algunos de los pozos para consumo siguen teniendo niveles potencialmente peligrosos de metales en sus aguas [14].

Fitorremediación con plantas macrófitas

Las macrófitas acuáticas se han utilizado ampliamente para la remediación de contaminantes en efluentes de aguas residuales y ambientes, como medio fitorremediante para aguas contaminadas por metales pesados, este trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar el grado de eficiencia de tres plantas macrófitas, camalote (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna minor*) y redonda de agua (*Hydrocotyle bonariensis*), en la remoción de cobre (Cu).

A continuación, se presentan las características de tres de las plantas que se han encontrado en la literatura que tienen una alta capacidad fitorremediante :

a. Lenteja de agua (*Lemna minor***).** La lenteja de agua es una macrófitas acuática flotante invasora con implicaciones ecológicas y económicas allí donde exista una colonia de la planta [15]. Posee una fusión entre ellos, denominado fronda, su tamaño varía entre 0.1 a 2 cm de diámetro. Su tasa de reproducción oscila entre 0.1 a 0.5 día^{-1}, lo que significa que puede duplicar su biomasa [16]. Posee un alto contenido de proteínas (31,19%), representando una buena alternativa como alimento de animales [17]. Estudios relacionan el uso de esta planta para el estudio de la toxicidad acuática, por su fácil recolección y cultivo [18]. Se tiene evidencia de la remoción de materia orgánica (BBO_5) [19] , ortofosfatos [20], a su vez es buen acumulador de boro (B) [21], Cr [22], cadmio (Cd), selenio (Se) y cobre (Cu), pero pobre acumulador de níquel (Ni) y plomo (Pb) [18].

b. Redonda de agua *(Hydrocotyle bonariensis).* es una planta flotante acuática, esta planta crece tanto en el suelo como en el agua, tarda en adaptarse tres (3) días, al cuarto (4) día inició con la reproducción, las hojas de estas plantas están unidas por peciolos delgados aproximadamente de 3-40 cm de longitud, además, presentan color amarillo el cual indica el proceso de secarse porque ya cumplieron su ciclo de vida, y otras pequeñas también están en proceso de crecimiento [23]. La Redonda de agua crece rápidamente en aguas calmadas ricas en nutrientes que presentan alto contenido de nitrógeno y fosfato [23]. Diversos estudios evidencian la de esta especie para reducir la materia orgánica (BBO_5) [24]. Además, presenta una alta capacidad hiperacumuladora de metales como plomo (Pb), hierro (Fe), zinc (Zn), fósforo (P) y calcio (Ca), atribuido a su sistema fibroso de sus raíces, capaces de retener y absorber elementos [25, 26].

c. Camalote (*Eichhornia crassipes).* Caracterizada por su flotación libre y capacidad de sumersión, presenta flores lilas o azuladas, se puede extender y sobrevivir en muchos sitios. Puede duplicar su tamaño en diez días y alcanzar una altura entre 0.5 a 1.5 metros desde la parte superior de la planta hasta la raíz. Su composición principal es el agua, presenta entre 93 y 95% de la masa total, dependiendo del medio en el que se desarrolle [17]. Esta especie crece tanto en aguas dulces ya sea en movimiento o tranquilas, como, también en canales, zanjas, presas, arroyos o pantanos [17]. Se ha registrado su presencia en medios acuáticos con un pH de 6,5 –7,5, una dureza de 12 –18 °dH, por lo general, se desarrolla bien en aguas fertilizadas con nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y en pequeñas cantidades de calcio (Ca), hierro(Fe), boro (B), azufre (S) , molibdeno(Mo), zinc (Zn), cobre (Cu) y aluminio (Al) [27]. Su sistema radicular puede albergar microorganismos que favorecen la acción depuradora de la planta [28].En condiciones normales la E. crassipes recubre la superficie de agua con una densidad de 10 Kg/m^2 (peso húmedo) y puede llegar hasta 80 Kg/m^2 [16].Trabajos evidencian que debido a sus características bioabsorventes, estas plantas se pueden desarrollar en humedales y ríos con grandes concentraciones de metales pesados, entre ellos cadmio (Cd), cromo (Cr) y zinc (Zn) [29].

Tabla 1. Condiciones óptimas de plantas macrófitas

Parámetros	Lenteja de agua	Redonda de agua	Camalote
Temperatura (°C)	15-32	15-28	25-30
pH	3-10	5-9	6.5-7.5
Distribución und/m^2 [30]	5000-6000	150-200	20-25

En la

Tabla 1 se presentan las condiciones óptimas de las tres especies macrófitas utilizadas en el estudio, además se señalan la distribución de una planta en un área determinada, indicando la cantidad de plantas que pueden existir en una extensión dentro de un cuerpo de agua.

2. Materiales y Métodos/Metodología

La investigación constó de un diseño experimental, dónde se manipuló las variables dependientes (concentración final de cobre, porcentaje de remoción y velocidad de remoción) y variables independientes (concentración inicial de cobre, tiempo de muestreo y especie vegetal). Contando con dos sitios experimentales, el sitio en campo dónde: se instalaron los reactores con las plantas, se recolectaban las muestras de agua, y el laboratorio dónde se realizaban los análisis correspondientes.

La parte experimental se realizó en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá, dónde se realizaron diluciones y mediciones de concentraciones de cobre en cada muestra.

El lugar seleccionado fue el sitio de áreas verdes, ubicado dentro de la Universidad Tecnológica de Panamá, corregimiento de Ancón, con coordenadas geográficas UTM (661108.35 E, 997449.79 N).

Se armó el sitio de muestreo, se colocaron dos mesas plegables para situar las plantas, tal como se muestra en la. El lugar seleccionado se encontraba bajo una carpa, dónde no hubo interferencia con variables como la precipitación, dejando libre el paso del viento y radiación solar, emulando un entorno natural (excepto el no acceso a la precipitación).



Figura 1. Sitio de muestreo ubicado en "áreas verdes" de la Universidad Tecnológica de Panamá

2.1 Equipos y materiales

- Espectrofotómetro portátil DR1900 (Hach ®)
- Multiparámetro, medidor portátil Milwaukee Modelo MW803
- Soluciones calibradoras para multiparámetro Milwaukee modelo MW803
- Sulfato de cobre pentahidratado $CuSO_4 \cdot 5H_2O$
- Reactivos de cobre marca Hach ®

2.2 Descripción de la metodología

La metodología se dividió en dos etapas, la primera donde se comparan los resultados de obtenidos por medio de las tres (3) plantas de estudio, y la segunda etapa donde se analizó la cinética consumo de la planta con mayor eficiencia de consumo.

Cada reactor experimental consistió en un reciente plástico con una capacidad de 3 L, conteniendo las distintas concentraciones teóricas de sulfato de cobre. Para cada tratamiento se establecieron tres réplicas independientes, un reactor control con planta (control biótico) y un reactor que contenía solución de cobre, pero sin la planta (control abiótico). Las muestras de agua fueron recolectadas diariamente en frascos ámbar de 20 mL para determinar la concentración residual de cobre mediante espectrofotometría.

Para la preparación de soluciones sobre se utilizó sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), el reactivo sólido fue pesado en una balanza de laboratorio para obtener cada concentración teórica para los tratamientos experimentales.

Etapa 1. Se realizó una comparación del porcentaje de efectividad de remoción de cobre de tres (3) plantas (Camalote, redonda de agua y Lenteja de agua) con propiedades fitorremediadoras de metales pesados como

el cobre, a una concentración inicial cercana de 30 mg/L, durante un periodo de 4 días, con ensayos de triplicado. La muestra considera fue tomada en envases herméticos de 20 ml tipo ámbar para ser llevados al laboratorio y determinar la concentración de cobre por medio del método 8506 USEPA [31]. Los datos fueron procesados en cuadros elaborados en Microsoft Excel.

Etapa 2. Se elaboró un análisis cuantitativo de la cinética de remoción de cobre, que realiza la planta con mayor consumo, con ensayos de triplicado. Y se apreció el comportamiento de la planta con distintas concentraciones teóricas de cobre.

- Concentración 1: 30 mg/L
- Concentración 2: 60 mg/L
- Concentración 3: 90 mg/L
- Concentración 4: 120 mg/L

En esta etapa se estableció un periodo de 18 días continuos y 1 día adicional, donde se observó las diferencias de consumo que presentaban cada planta. La muestra considera fue tomada en envases herméticos de 20 ml tipo ámbar para ser llevados al laboratorio y determinar la concentración de cobre por medio del método 8506 USEPA [31]. Los datos fueron procesados en cuadros elaborados en Microsoft Excel.

3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestra el porcentaje de efectividad de remoción de cobre de las tres (3) plantas del estudio, donde se proyecta que la planta Camalote ((*Eichhornia crassipes*) obtuvo el mayor porcentaje de efectividad de remoción.

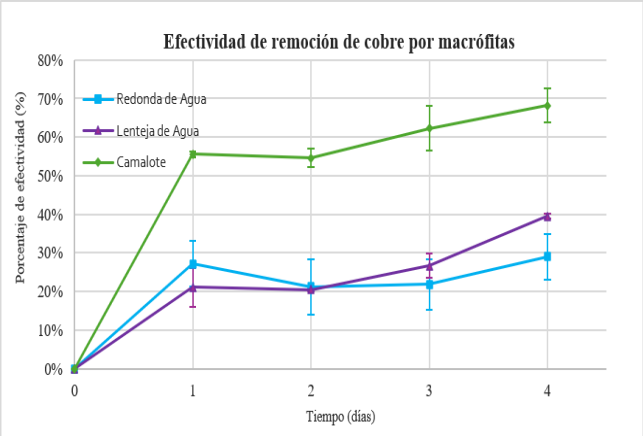


Figura 3. Porcentaje de Efectividad de remoción de Cobre Durante un Período de Tiempo

El porcentaje de efectividad de la Redonda de agua (*Hydrocotyle bonariensis*) al final del estudio fue de 29%. En comparación al estudio de [32] donde obtuvieron un porcentaje de efectividad de 98.97%, esto al mes de estudio.

La lenteja de agua (*Lemna minor*) al final del estudio tuvo un porcentaje de efectividad de 40%, en comparación al estudio de Montenegro [33] donde obtuvo una efectividad de 30% a los siete (7) días, y de 93.21% a los 28 días de estudio. Asimismo, el estudio por Carhuallanqui et al. [34] obtuvo una efectividad de 28.20% a los cinco (5) días, y de 68.57% a los 28 días de estudio.

El porcentaje de efectividad del Camalote (*Eichhornia crassipes*) al final del estudio fue de 68%, siendo el mayor porcentaje presentado entre los ensayos realizados. En comparación con el estudio de Barreto y Paredes [35] donde obtuvo una efectividad de 98.34% para un periodo de 20 días y una concentración inicial de 30 mg/L.

La Figura 4. muestra comportamiento de la cinética de consumo de cobre al cual reacciona el camalote (*Eichhornia crassipes*) frente a diferentes concentraciones de cobre. Considerando los valores obtenidos hasta el punto de mayor asimilación de cobre. La tendencia evidencia un aumento en la velocidad de consumo conforme incrementa la concentración de cobre, describiéndose mediante un ajuste lineal con una alta correlación.

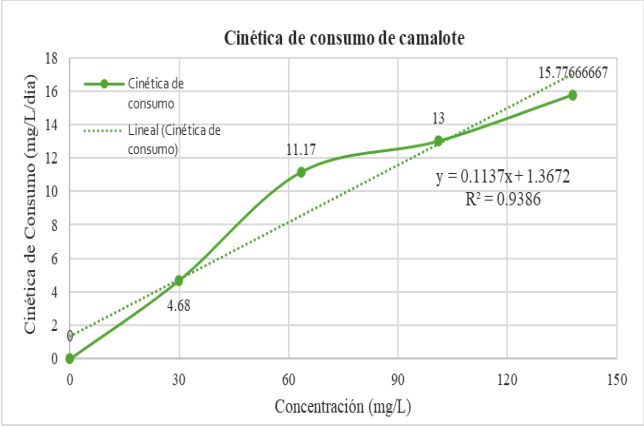


Figura 5. Cinética de Consumo de la Planta Camalote (*Eichhornia crassipes*) en Relación con Distintas Concentraciones de Cobre (Cu)

La (1 surge de la tendencia representada por la Figura 6 por la planta camalote (*Eichhornia crassipes*).

$$V = 0.1137 * C + 1.3672 \quad (1)$$

Donde:

V= Velocidad de consumo (mg/L/día)

C= concentración de cobre (mg/L)

La velocidad de consumo proviene de la tasa de cambio de la concentración de cobre que disminuye por día. La ecuación (1) es una ecuación de regresión linead obtenida después de calcular las velocidades experimentales, con un coeficiente de determinación R^2=0.9386, indicando una asociación fuerte para las variables utilizadas. No obstante, este comportamiento corresponde a la velocidad de remoción expresada en mg/L/día y no implica que el porcentaje (%) de remoción aumente proporcionalmente con la concentración inicial de cobre, debido a que la eficiencia presentó un comportamiento variable entre los tratamientos evaluados.

Tabla 2. Resultado del porcentaje de remoción de cobre por la planta *Eichhornia crassipes*

Resultados *Eichhornia crassipes*				
Concentración teórica de Cu (mg/L)	Concentración real de Cu (mg/L)	Días	Remoción %	pH
30	29.9	19	46	6.57
60	63.5	19	63	6.10
90	101	19	40	5.58
120	138	19	57	5.53

En la Tabla 2, se muestran los resultados de las concentraciones, dando a señalar que el comportamiento de la remoción de cobre. En la primera concentración inicial, se obtuvo una remoción del 46 %. En la primera fase, con la misma concentración de 30 mg/L, se obtuvo una disminución del 68.17% sólo en cuatro (4) días. Dichas diferencias de concentración podrían deberse a las condiciones estacionales a las que se encuentren las plantas macrófitas, según el estudio de Hadad y Maine [36], durante los meses de verano, las especies flotantes pequeñas muestran una mayor capacidad para remover cantidades significativas de nutrientes, debido a factores como la temperatura y radiación solar que estimulan los procesos de fotosíntesis y crecimiento de las mismas plantas.

4. Conclusiones

Al analizar la eficiencia de consumo de cobre en las muestras de agua de las plantas macrófitas redonda de agua (*Hydrocotyle Bonariensis*), lenteja de agua (*Lemna minor*) y camalote (*Eichhornia crassipes*) a concentraciones iniciales cercanas a valores de 30 mg/L, se concluye que esta última tiene mayor grado de eficiencia llegando a ser de 68%.

En la planta Camalote se evidencia un comportamiento variable entre concentraciones, observándose la mayor eficiencia a 60 mg/L.

Se recomienda determinar la capacidad fitorremediante frente a concentraciones más elevadas y bajo distintas condiciones climáticas, así como implementar métodos mecánicos de agitación que garanticen una mayor homogeneidad del metal pesado en el agua. Por otro lado, sería conveniente realizar análisis con otros metales pesados presentes en cuerpos de agua, a fin de evaluar la eficiencia remediante frente a distintos contaminantes .

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestra asesora la Dra. Viccelda Domínguez y al personal del laboratorio de sanitaria de la Universidad Tecnológica de Panamá. Su contribución fue esencial para el desarrollo de esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Alberto Lizondro: Conceptualización, Metodología, Redacción, Ariel Solís: Análisis de datos, Toma de muestras, Revisión-Edición, Viccelda Domínguez: Conceptualización, Validación y Supervisión.

Todos los autores afirmamos que hemos leído y aprobado la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

[1] M. C. Dozier, M. McFarland y B. J. Lesikar, «Problemas del agua potable : El cobre,» 2006. [En línea]. Available: https://www.kansas4-h.org/resources/spanish-information/recursos/docs/salud-y-seguridad/problemas_con_el_agua_cobre.pdf.

[2] J. Vymazal, «The use of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater,» *Ecological Engineering,* pp. 1-17, 2009.

[3] Ecologistas en Acción., «Fitorremediación,» 01 Junio 2008. [En línea]. Available: https://www.ecologistasenaccion.org/17857/fitorremediacion/ .

[4] R. C. Durling, «Mining 2025,» 23 Enero 2025. [En línea]. Available: https://practiceguides.chambers.com/practice-guides/mining-2025/panama/trends-and-developments?.

[5] International Institute for Sustainable Development (IISD), «EVALUACIÓN DEL MARCO DE POLÍTICAS MINERAS,» 2020.

[6] D. I. R. Caviedes , D. R. Delgado y O. A. Alfredo, «Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales,» *Producción+ Limpia,* pp. 11(2), 126-149, 2016.

[7] A. Klumpp, K. Bauer, C. Franz-Gerstein y M. de Menezes, Variation of nutrient and metal concentrations in aquatic macrophytes along the Rio Cachoeira in Bahia (Brazil), Bahia, Brazil: Environment International, 2002.

[8] International Copper Association., «Resource Library,» 31 octubre 2024. [En línea]. Available: https://internationalcopper.org/es/trends-and-data/resource-library/.

[9] D. Pellicer, «Propiedades del Cobre,» 27 marzo 2024. [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-cobre-cu_21925.

[10] T. S. Durrani, «Mc Graw Hill,» 2022. [En línea]. Available: https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=3227&sectionid=272190623.

[11] F. A. P. Altamira, «Efectos del cobre en altas concentraciones sobre la diversidad de las comunidades bacterianas de suelos agrícolas de la región de Valparaíso,» 2010. [En línea]. Available: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112092#:~:text=La%20presencia%20de%20cobre%20en,y%20da%C3%B1os%20en%20el%20ecosistema..

[12] I. N. Gallego, «Biodiversity of primary producers in farm ponds from andalusia. Biodiversidad de productores primarios en balsas de riego de andalucía,» *Doctoral dissertation, Universidad de Almería,* 2015.

[13] J. A. Ipinza, «LIXIVIACION DE MINERALES DE COBRE USANDO CLORURO DE SODIO SÓLIDO Y SALMUERAS,» *Universidad Técnica Federico Santa María,* 2017.

[14] B. Tuncak, C. C. R. S. CCRS y ProjectPODER, *Derrame de 40 millones de litros de solución de cobre acidulado a los ríos Bacánuchi y Sonora provenientes de las instalaciones de la mina Buenavista del Cobre, SA de CV, subsidiaria de Grupo México,* 2018.

[15] A. O. S. F. D. &. N. E. O. Ekperusi, «Application of common duckweed (Lemna minor) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective,» *Chemosphere,* vol. Chemosphere, nº 223, pp. 285-309, 2019.

[16] J. Jaramillo y C. Flores, «Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera,» *Bachelor's thesis,* 2012.

[17] L. M. R. Intriago, H. R. R. Intriago, P. G. Palomeque, J. L. C. Solano y I. R. Delgado, «Efecto fitorremediador de Lemna minor y Eichhornia crassipes en parámetros físicos y químicos en aguas residuales domésticas,» *South Florida Journal of Development,* vol. 5, nº 2, pp. 688-696, 2024.

[18] M. d. P. Arroyane, «LA LENTEJA DE AGUA (Lemna minor L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA,» *Revista eia,* nº 1, p. 33.38, 2004.

[19] N. A. C. Maco , «Influencia del jacinto de agua (Eichhornia crassipes) en la concentración de metales de aguas superficiales del río Coralaque, Moquegua 2021,» 2023.

[20] E. Öbek y H. Hasar, «HARVESTING IN BIOLOGICAL PHOSPHATE REMOVAL FROM SECONDARY TREATMENT EFFLUENTS,» 2002.

[21] G. Aparicio y I. Beigfabigaílv, «Eficacia de las macrófitas jacinto y lenteja de agua para disminuir la concentración del boro, en las aguas minerotermales de la “laguna la milagrosa”-Chilca, 2017,» 2017.

[22] H. Velarde, A. Zavaleta y Q. Aguilar, «Estudio de la absorción del ion cromo VI con jacinto de agua (Eichhornia crassipes).,» vol. 2, 2013.

[23] E. L. Huamani , D. A. Huayta y D. F. V. Ortega , «Eficiencia de remoción de la especie Hydrocotyle bonariensis (redondita de agua) y Eichhornia crassipes (jacinto de agua) en las aguas residuales del río Shullcas,» 2021.

[24] E. J. L. Parra, «Evaluación de la eficiencia de la remoción de plomo en aguas residuales del río Tarma usando Hydrocotyle bonariensis Lam. y Typha latifolia L. en humedales artificiales,» Lima, Perú, 2020.

[25] A. Zayed, S. Gowthaman y N. Terry, «Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed,» *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.,* vol. 27, nº 3, pp. 715-721), 1998.

[26] M. G. Higuera , R. Peña y L. Escalante, «UTILIZACIÓN DE Hydrocotyle umbellata EN LA ABSORCIÓN DE ELEMENTOS CONTAMINANTES ESPECÍFICO S EN

AGUAS RESIDUALES,» *Tecnociencia,* vol. 21, nº 1, pp. 15-25, 2019.

[27] B. E. M. Quiñónez, «Evaluación y monitoreo del uso de LEMNA MINOR Y EICHORNIA CRASSIPES como medida de fitorremediación de aguas residuales en las riveras del Refugio De Vida Silvestre Manglares Estuario Río Esmeraldas,» 2018. [En línea]. Available: https://catalogobiblioteca.puce.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=258247.

[28] M. P. v. Reyes , «FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN Y TRASLOCACIÓN DE METALES PESADOS EN Eichhornia crassipes DE LA LAGUNA OLMECA EN VERACRUZ,» 2020.

[29] A. P. Vitória, J. Luís da Silva Santos , M. S. Moreira Barros Salomão, T. Oliveira Vieira, . M. Da Cunha, S. F. Pireda y G. R. Rabelo, «Influence of ecologic type, seasonality, and origin of macrophyte in metal accumulation, anatomy and ecophysiology of Eichhornia crassipes and Eichhornia azurea,» *Aquatic Botany,* vol. 125, pp. 9-16, 2015.

[30] E. C. De La Cruz , «Modelo de tratamiento de aguas residuales mediante humedal con macrofitas flotantes en el distrito de Pucará,» 2023.

[31] Hach, «Copper,» *USEPA1,2 Bicinchoninate Method-Method 8506,* 2017.

[32] R. D. Vera y C. C. Soto Carrión, «POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN DEL MATECLLO (Hydrocotyle ranunculoides L.f.) EN AGUAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS DE LA QUEBRADA PACCHANTAY,» *Hatun Yachay Wasi,* vol. 3, nº 1, pp. 86-97, 2024.

[33] J. F. V. Montenegro , «Determinación de efectividad de la absorción de cadmio y cobre por acción de Lemna minor en el Tragadero Yacuchingana,» 2021. [En línea]. Available: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/92720.

[34] G. M. A. Carhuallanqui, C. V. Villareal y L. E. A. Pichiule, «Tratamiento de aguas residuales mineras contaminadas con cobre mediante Lemna minor (lenteja de agua),» *Prospectiva universitaria,* vol. 15, nº 1, pp. 101-104, 2018.

[35] Y. Barreto y J. Paredes, «Determinacion Del Potencial De Absorcion De Cobre En Solucion Acuosa De Las Especies,» *RevIA,* vol. 5, nº 1 y 2, 2015.

[36] H. R. Hadad y M. A. Maine, «Phosphorous amount in floating and rooted macrophytes growing in wetlands from the Middle Paraná River floodplain (Argentina),» *Ecological engineering,* vol. 31, nº 4, pp. 251-258, 2007.