

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

2026

ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD



Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2026-050410175100-102. ISSN: 2448-8186



DIRECTORIO

L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO

Rector

DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA

Secretario de Servicios Académicos

LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO

Encargado del Despacho de la Secretaría de
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.latindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 2, Año 2026, es una publicación continua editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2026-050410175100-102, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 31 de agosto 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores
EDITORA EN JEFE

M.A. Pauly González Mayo
GESTORÍA Y ASISTENCIA EDITORIAL

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano
MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez
ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO

Dra. Sulma Guadalupe Gómez Jiménez
Dra. Margarita del Carmen Noguera Miceli
ASISTENCIA EN TRADUCCIÓN Y MAQUETADO

EDITORES ASOCIADOS INVITADOS

Dr. Darío Colorado Garrido. **Universidad Veracruzana**
Dra. Linda Viviana García Quiñonez. **Universidad Veracruzana**
Dr. Cristian Gómez. **Universidad Veracruzana**
Dra. Deysi Carmina Peña Ortiz. **Universidad Veracruzana**
Dr. Roberto Agustín Conde Gutiérrez. **Universidad Veracruzana**
Dr. Gerardo Alcalá Perea. **Universidad Veracruzana**
Dra. Zaira Ruth Zuviría López. **Universidad Autónoma de Guadalajara**
Dra. Karen Rodríguez Rosales. **Universidad Autónoma de Querétaro**
Dra. Laura López Díaz. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**
Dr. Erik Ramírez Morales. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, **Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luís Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

Índice Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Carta editorial

Zuviría-López Z.R.

Integración de calor en la purificación de ciclohexano grado textil utilizando etilenglicol como solvente 1-16

Cruz-Valdez J.A.^{1*}, Álvarez-Alor B.², Montalvo-Salinas D.³, Garzón-Pérez A.S.⁴, Alvarado-Méndez P.E.⁵

Fotosíntesis artificial efecto sinérgico de Ti^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+} en los mecanismos de activación, acoplamiento c-c hacia la producción de isopropanol 17-30

Pérez- de la Cruz A.Y.¹, Montalvo-Salinas D.^{2*}, Cruz-Valdez J.A.¹, Pérez- Francisco J.M.¹, Jiménez- Castillo U.¹, Álvarez-Alor B.³

Predicción de la potencia en una turbina vestas v52 mediante regresión polinomial y una red neuronal 31-46

Olan-Barroso A.A.^{1*}, Alaffita-Hernández F.A.², Escobedo-Trujillo B.A.¹, Colorado-Garrido D.²

Estrategias de ingeniería de software verde para aplicaciones energéticamente eficientes 47-54

Morales-Reyes E.^{1*}, Pacheco-Reyes J.N.¹, Vázquez-Hernández R.¹, Gilbón-Aburto A.¹, Gómez-Manuel E.¹

Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico en Coatzacoalcos, México 55-70

Rodríguez-Flores E.¹, González-Martínez M.I.², Fuentes-Orozco S.², Garrido-Meléndez J.³, Márquez-Nolasco A.⁴, Conde-Gutiérrez R.A.^{4*}

Determinación de la acumulación de metales en *eichhornia crassipes* para valorización de biomasa 71-80

Benítez-Martínez X. S.¹, Domínguez-Villate W. A.¹, Núñez-Correa S.¹, Morales-Salas L.^{2,3*}

Restricciones de sostenibilidad y riesgo de cola en portafolios accionarios de México 81-96

Villada-Medina H.D.^{1*}, Rendón-García J.F.¹, Alcalá-Perea G.²

Análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada con reducción del rizo de corriente de entrada para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno 97-114

Hidalgo-Leal H.D.¹, Cruz-Gutiérrez F.^{1*}, May-Burgos L.D.¹, Sarao-Cruz L.D.J.¹, Pérez-Aguilar A.¹

Determinación de la acumulación de metales en *Eichhornia crassipes* para valorización de biomasa**Determination of metal accumulation in *Eichhornia crassipes* for biomass valorization**Benítez-Martínez X. S.¹, Domínguez-Villate W. A.¹, Núñez-Correa S.¹, Morales-Salas L.^{2,3*}¹Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana
Avenida Universidad Veracruzana Km 7.5, Colonia Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos Ver. México.²Facultad de Ingeniería. Universidad Veracruzana
Avenida Universidad Veracruzana Km 7.5, Colonia Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos Ver. México³Tecnológico Nacional de México Campus Coatzacoalcos, ITESCO
Carretera, Antigua a Minatitlán Km 16.5, Reserva Territorial, 96536 Coatzacoalcos, Ver. México

*limos_01@yahoo.com

Artículo Científico**Publicado: 31 de agosto 2026****RESUMEN**

La toxicidad de los metales en cuerpos de aguas representa un riesgo para la salud pública y el ambiente debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación. En sistemas acuáticos, como el río Coatzacoalcos, se ha observado una alta proliferación de *Eichhornia crassipes*, especie invasora, asociada a ambientes contaminados. Debido a su abundancia, se evaluó la acumulación de Ni, Cr, Pb, Hg y Cd en esta especie, así como en el agua con el fin de determinar su potencial fitorremediador.

Las muestras fueron recolectadas en el río Coatzacoalcos, en las inmediaciones de la ciudad de Coatzacoalcos, Ver. El *E. crassipes* fue lavado, separado en parte aérea y raíces, secado, triturado y tamizado. Tanto las muestras del agua como las de biomasa vegetal fueron sometidas a digestión ácida con HNO_3 y H_2O_2 ; posteriormente, se filtraron y aforaron para su análisis. La cuantificación de metales se realizó mediante ICP-MS.

Los resultados en agua mostraron concentraciones de Cr (0.0545 mg L^{-1}) y Hg (0.0075 mg L^{-1}) superiores a los límites permisibles establecidos en las normas NOM 127-SSA1-2021 y NOM-001-SEMARNAT-2021, lo que representa un riesgo para la salud humana por su carácter carcinógeno y bioacumulable. En contraste, *E. crassipes* presentó mayor acumulación de Ni, Cr y Pb, atribuida a la presencia de grupos funcionales en su pared celular que favorecen mecanismos como la absorción y el intercambio iónico.

Se concluye que el río Coatzacoalcos excede la normativa mexicana vigente en Hg y Cr, y que el *E. crassipes* actúa como bioindicador eficaz con alto potencial para fitorremediación in situ.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, fitorremediación, metales pesados.

ABSTRACT

The presence of toxic metals in aquatic systems represents a risk to public health and the environment due to their persistence and potential for bioaccumulation. In the Coatzacoalcos River, a high proliferation of *Eichhornia crassipes*, an invasive aquatic species commonly associated with contaminated environments, has been observed. Given its abundance, the accumulation of Ni, Cr, Pb, Hg, and Cd in *E. crassipes* and the surrounding water was evaluated to assess its potential for phytoremediation.

Samples were collected from the Coatzacoalcos River near the city of Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico. *E. crassipes* samples were washed, separated into aerial parts and roots, dried, ground, and sieved. Water and plant biomass samples were subjected to acid digestion using HNO₃ and H₂O₂, followed by filtration and dilution to a defined volume. Metal concentrations were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

The results showed that Cr and Hg concentrations in water exceeded the permissible limits established by NOM-127-SSA1-2021 and NOM-001-SEMARNAT-2021, indicating potential environmental and human health concerns. In contrast, *E. crassipes* exhibited greater accumulation of Ni, Cr, and Pb, which may be associated with functional groups present in the plant cell wall that facilitate metal uptake and retention through mechanisms such as adsorption and ion exchange. These findings indicate that Cr and Hg concentrations in the Coatzacoalcos River exceed current Mexican regulatory limits and that *E. crassipes* may serve as a useful bioindicator and has potential for in situ phytoremediation of metal-contaminated aquatic environments.

Keywords: *Eichhornia crassipes*; phytoremediation; toxic metals; bioaccumulation; Coatzacoalcos River.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados constituye una problemática ambiental a nivel global debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son degradados por procesos naturales, por lo que permanecen durante largos periodos en el ambiente, acumulándose en sedimentos, organismos acuáticos y cadenas tróficas. Esta característica incrementa el riesgo ecológico y sanitario, ya que pueden incorporarse al organismo humano a través del consumo de agua o alimentos contaminados [1,2]. Entre los metales de mayor relevancia toxicológica se encuentran el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y níquel (Ni), asociados con efectos adversos como estrés oxidativo, alteraciones fisiológicas, daño neurológico y enfermedades crónicas [3].

Las principales fuentes de contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos están relacionadas con actividades antropogénicas como la industria, la minería, la agricultura y las descargas urbanas, como se observa en la **Figura 1**. Estas actividades incrementan significativamente las concentraciones naturales de los metales en los ecosistemas, alterando el equilibrio ambiental y generando efectos negativos en la salud humana y en la biodiversidad [3].

En respuesta a esta problemática, se han establecido normas regulatorias para controlar la calidad del agua. En México, las normas NOM-127-SSA1-2021 y NOM-001-SEMARNAT-2021 establecen los límites permisibles de metales pesados en agua potable y en descargas hacia cuerpos receptores [4, 5]. Sin embargo, diferentes estudios han reportado que aproximadamente el 70% de los ríos en el país presentan algún grado de contaminación, reflejando la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental y desarrollar estrategias sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas [6].

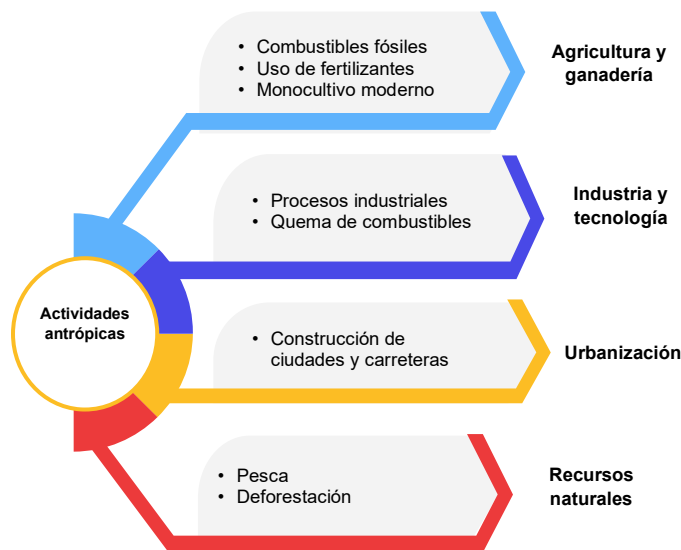


Figura 1 Actividades Antrópicas

El río Coatzacoalcos, ubicado en el sur del estado de Veracruz, es uno de los sistemas fluviales más importantes de México debido a su relevancia ambiental, económica e industrial. Este río, inicia su recorrido en la Sierra de Niltepec, Oaxaca, y abarca aproximadamente 21000 km² hasta desembocar en el Golfo de México. Desempeña un papel fundamental en el desarrollo industrial del país, ya que en sus inmediaciones se concentran industrias químicas y petroquímicas. Asimismo, constituye una vía estratégica para el transporte de mercancías y una fuente de recursos para actividades primarias como la pesca y agricultura. Sin embargo, el crecimiento industrial y urbano en la región ha provocado un deterioro progresivo en la calidad del agua [7,8].

Investigaciones realizadas en sedimentos, agua y fauna acuática han reportado la presencia de metales pesados en el río Coatzacoalcos; destacando Pb, Hg, Ni y Cr, los cuales representan un riesgo para los ecosistemas acuáticos y la población que depende de este recurso. Estudios han identificado concentraciones de Hg en poblaciones cercanas al río Coatzacoalcos, evidenciando procesos de bioacumulación asociados al consumo de peces contaminados [9]. Estos hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental y desarrollar alternativas sostenibles para la remoción de metales pesados.

En los últimos años, la fitorremediación ha sido propuesta como una alternativa para el tratamiento de ecosistemas contaminados. Este proceso consiste en el uso de plantas o microorganismos capaces de absorber, acumular, transformar o estabilizar contaminantes mediante mecanismos fisiológicos y bioquímicos. En comparación con los métodos convencionales, presenta ventajas como menor costo, menor impacto ambiental y posibilidad de aplicación in situ [10]. Entre las especies con mayor potencial en sistemas acuáticos se encuentran las macrófitas flotantes, caracterizadas por poseer sistemas radiculares extensos que favorecen la absorción y retención de contaminantes.

E. crassipes, macrófita originaria de la cuenca del Amazonas, es considerada una de las plantas invasoras más agresivas a nivel mundial. Se caracteriza por su rápido crecimiento, elevada capacidad reproductiva y alta adaptabilidad a ambientes contaminados. Su pared celular está compuesta por biopolímeros como celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyos grupos funcionales (hidroxilos, carboxilos y metoxilos) interactúan con iones metálicos mediante procesos de complejación e intercambio iónico, favoreciendo su acumulación en los tejidos vegetales [11-13].

Debido a estas características, *E. crassipes* ha sido utilizada como bioindicador de contaminación y como agente potencial en procesos de fitorremediación. Sin embargo, a pesar de su abundancia en diversos cuerpos de agua en México, incluido el río Coatzacoalcos, resulta necesario evaluar su capacidad de acumulación de metales pesados. Esto permitirá validar su uso como herramienta de monitoreo ambiental y explorar el aprovechamiento de su biomasa en aplicaciones tecnológicas y procesos químicos sostenibles. **Figura 2.**



Figura 2 a) Plantas de *Eichhornia crassipes* recolectadas. b) Biomasa seca obtenida.

En este contexto, en el presente estudio se evaluó la presencia de Ni, Cr, Pb, Hg y Cd en agua y en *E. crassipes* recolectada en el río Coatzacoalcos con el fin de determinar su potencial como fitorremediador in situ.

METODOLOGÍA

Muestra vegetal. La muestra de *E. crassipes* fue lavada con agua potable, para luego ser separada en raíces y parte aérea. Las fracciones obtenidas se sometieron a secado en un horno ECOSHEL, modelo 9053A a 60 °C durante 48 h para parte aérea y 60 h para las raíces. Una vez obtenida la

biomasa seca, esta fue triturada en una licuadora Taurus HALEY, hasta obtener partículas finas, las cuales fueron tamizadas mediante una malla de 30 mesh.

Digestión ácida (biomasa). Se colocó 1 g de biomasa seca en un vaso de precipitados de 250 mL y; bajo campana de extracción, se adicionaron 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) al 64.9 %. La mezcla se dejó reposar durante 24 h. **Figura 3.**



Figura 3 Muestra vegetativa después de 24 h de reposo con NHO_3



Figura 3 Muestra vegetativa al finalizar la segunda etapa de digestión.

Posteriormente, se llevó la segunda etapa de digestión en una parrilla previamente calentada a 60 °C, donde se adicionaron 10 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 50 %, controlando la temperatura para evitar la ebullición. Transcurrida 1 h y reducido el volumen a aproximadamente 5 mL, se añadieron nuevamente 5 mL de H_2O_2 , repitiendo este procedimiento cada 30 minutos durante 2 h 30 min, hasta obtener una coloración clara con un volumen final de 5 mL.

Las muestras digeridas se retiraron de la parrilla con pinzas metálicas y se dejaron enfriar a temperatura ambiente bajo campana de extracción.

Filtrado y aforado (biomasa). La solución obtenida fue filtrada mediante papel Whatman de 125 mm utilizando una bomba de vacío. El filtrado se transfirió a un matraz volumétrico de 50 mL, y se aforó con agua destilada. Posteriormente, la solución se homogenizó y se almacenó en frascos ámbar a 4 °C.

Muestra de agua. La muestra de agua del río Coatzacoalcos fue recolectada conforme a la NMX-AA-14-1980 (Cuerpos receptores). Durante el muestreo, se determinaron in situ los parámetros de pH y temperatura. En el laboratorio, la muestra fue acidificada con HNO_3 al 64.9 % hasta alcanzar a un pH de 2 y finalmente se almacenó a 4 °C hasta su análisis.

Digestión ácida (agua). La digestión de la muestra agua se realizó conforme a lo establecido por Reyes Vásquez (2020). Se colocaron 10 mL de muestra en un vaso de precipitados de 250 mL y se

adicionaron 10 mL de H_2O_2 al 50 %. La mezcla se mantuvo en una parrilla a 60 °C durante 2 h, hasta reducir el volumen aproximadamente 5 mL. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente bajo campana de extracción.

Filtrado y aforado (agua). La muestra digerida se filtró con papel Whatman de 125 mm mediante bomba de vacío. El filtrado se transfirió a un matraz de 50 mL, se aforó con agua destilada y se homogenizó. Finalmente, la solución se almacenó en frascos ámbar a 4 °C. **Figura 4.**

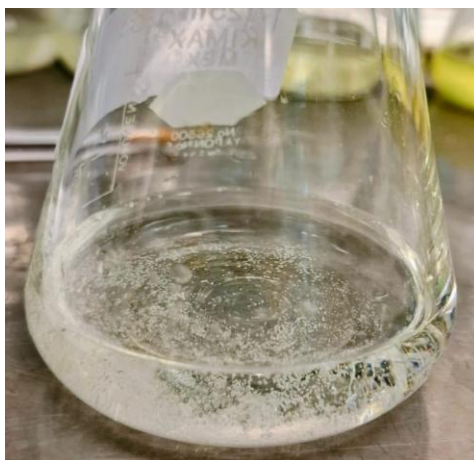


Figura 4 Muestra de agua al terminar de la digestión ácida.

Análisis ICP-MS. La determinación de las concentraciones de Cr, Ni, Cd, Pb y Hg, se realizó mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés) utilizando un equipo Agilent Technologies, Modelo 7800. Se realizaron tres repeticiones por muestra y 100 ciclos de lectura, con un tiempo de purga de 50 s seguido de 50 s de estabilización de plasma. Se emplearon tres puntos por masa en el patrón de pico, lo que permitió obtener resultados consistentes y reducir la variabilidad en las mediciones.

RESULTADOS

Agua. En la **Tabla 1**, se presentan las concentraciones de los metales Ni, Cr, Pb Hg y Cd determinados en la muestra de agua recolectada en el río Coatzacoalcos. Se observa que la concentración de Cd se encuentra por debajo del límite de detección del equipo ICP-MS, mientras que los metales con mayor concentración son Cr y Ni; en contraste Pb y Hg se encontraron en concentraciones menores.

Tabla 1 Concentración de metales pesados en muestra de agua del río Coatzacoalcos.

Metal	Concentración Promedio (mg L ⁻¹)
Ni	0.0378
Cr	0.0545
Pb	0.007
Hg	0.0075
Cd	<0.0005

Estos resultados confirman la presencia de trazas de metales pesados en el agua del río Coatzacoalcos, proporcionando un panorama general de la calidad del agua en el sitio evaluado.

En la **Figura 5** se presenta la comparación de las concentraciones de metales en muestras de agua del río Coatzacoalcos con los límites establecidos en las normas: NOM-001-SEMARNAT-2021, “Que establece los límites permisibles de contaminantes en las aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación”, y NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”. En la figura se observa que el Hg sobrepasa los límites establecidos en ambas normas, mientras que la concentración de Cr en agua únicamente excede los límites de la NOM-127-SSA1-2021.

La presencia de Hg y Cr en aguas del río Coatzacoalcos resulta preocupante, debido a que ambos metales son considerados agentes carcinógenos y genotóxicos, con capacidad de bioacumulación y biomagnificación en los tejidos que los absorben [2].

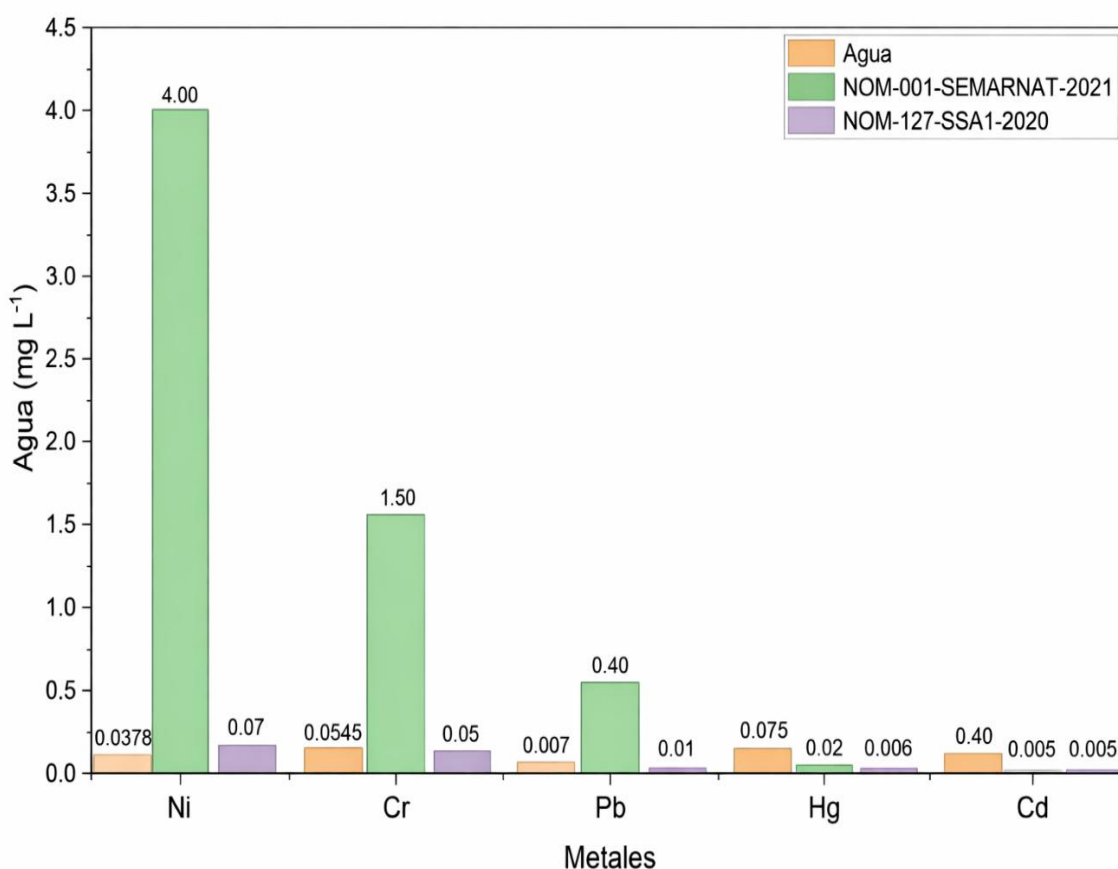


Figura 5 Comparación de metales pesados encontrados en aguas del río Coatzacoalcos y las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-127-SSA1-2020.

***Eichhornia crassipes*.** En la **Figura 6**, se muestran las concentraciones promedio de los metales determinados en *E. crassipes*. Se observa que los metales con mayor concentración son Ni, Cr y Pb; mientras que Hg y el Cd se encuentran en menores concentraciones.

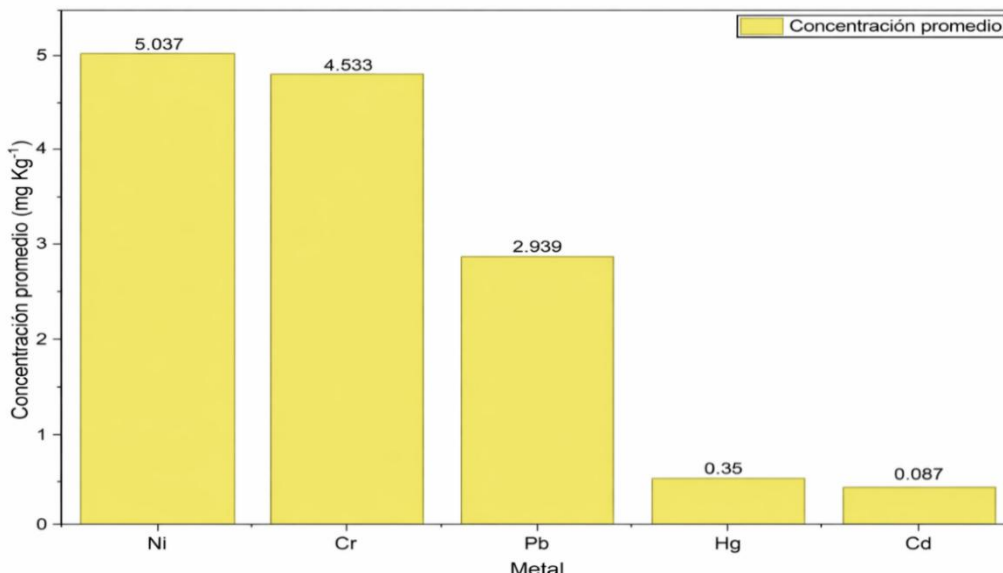


Figura 6 Concentraciones promedio de metales encontrados en el Jacint de agua recolectado en el río Coatzacoalcos.

La acumulación de metales pesados en *E. crassipes* se atribuye a la composición de la pared celular, constituida principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa. Estos biopolímeros aportan grupos funcionales como aminas, carboxilos, hidroxilos, sulfhídricos, carbonilos y fosfatos, los cuales favorecen la remoción de contaminantes disueltos en el agua mediante mecanismos como: complejación, coordinación, quelación, intercambio iónico y absorción [12, 14].

CONCLUSIONES

El presente estudio confirma la presencia de metales pesados en el río Coatzacoalcos, evidenciando una problemática ambiental relevante. Los resultados indican que las concentraciones de Hg y Cr superan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano, y en el caso de Hg, también excede los límites de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descarga de aguas residuales. Esta situación representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos y para la población que depende de este recurso, debido al carácter carcinógeno, genotóxico y bioacumulable de dichos metales.

Asimismo, el análisis del *E. crassipes* demostró su capacidad para absorber y acumular metales pesados, destacando Ni, Cr y Pb. Esta capacidad de bioacumulación confirma su potencial como una herramienta de fitorremediación in situ, al actuar como un sistema biológico capaz de disminuir la concentración de contaminantes en el agua. Siendo los grupos funcionales que constituyen los

biopolímeros de su pared celular los que facilitan la remoción de los metales mediante diversos mecanismos fisicoquímicos.

Por último, los resultados obtenidos permiten diagnosticar el grado de contaminación por metales pesados en el sitio de estudio y evaluar el potencial fitorremediador del *Eichhornia crassipes*. Se concluye que esta macrófita, además de actuar como un bioindicador eficaz de contaminación en el río Coatzacoalcos, representa una alternativa viable y sostenible para el desarrollo de estrategias de remediación ambiental. Se recomienda fortalecer el monitoreo continuo del río Coatzacoalcos y explorar el aprovechamiento de la biomasa residual posterior a la fitorremediación, con el fin de evitar la reincorporación de los metales al ambiente.

REFERENCIAS

- [1] Covarrubias, S. A., & Peña-Cabriaes, J. J. (2017). *Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 33(1), 7–21.
- [2] Cruz-Santiago, O., Torres-Dosal, A., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D. J., & Malafaia, G. (2024). *Regiones de emergencia sanitaria y ambiental en México: Una breve revisión sobre la cuenca baja del río Coatzacoalcos*. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 93, 10.
- [3] De Alba, F., & Martín Cerón, J. (2019). *En contexto: Los ríos revueltos, radiografía de la contaminación*. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP), 3–26.
- [4] Gebrehiwot, H., Dekebo, A., & Endale, M. (2022). *Chemical Composition, Pharmacological Activities, and Biofuel Production of Eichhornia crassipes (Water Hyacinth): A Review*. Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry, 9(3), 849–866.
- [5] Lima, H. D. P., & Asencios, Y. J. (2021). *Eichhornia crassipes (Mart.) Solms (natural or carbonized) as biosorbent to remove pollutants in water*. SN Applied Sciences, 3(8), 750.
- [6] Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. Bin, Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. M., Khandaker, M. U., Osman, H., Alhumaydhi, F. A., & Simal-Gandara, J. (2022). *Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity*. Journal of King Saud University - Science, 34(3), 101865.
- [7] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). *Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Alto Río Coatzacoalcos, Bajo Río Coatzacoalcos, Alto Río Uxpanapa, Bajo Río Uxpanapa, Río Huazuntlán y Llanuras de Coatzacoalcos, pertenecientes a la Subregión Hidrológica Coatzacoalcos de la Región Hidrológica número 29 Coatzacoalcos*. Diario Oficial de la Federación (DOF). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5485833

- [8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación (NOM-001-SEMARNAT-2021)*. Diario Oficial de la Federación (DOF). <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-001-semarnat-2021/>
- [9] Secretaría de Salud. (2022). *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua (NOM-127-SSA1-2021)*. Diario Oficial de la Federación (DOF). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705
- [10] Sharma, A., & Aggarwal, N. K. (2020). *Water Hyacinth: A Potential Lignocellulosic Biomass for Bioethanol*. Springer International Publishing, Cham.
- [11] Tejada-Tovar, C., Paz-Astudillo, I., Villabona-Ortíz, A., Espinosa-Fortich, M., & López-Badel, C. (2018). *Aprovechamiento del Jacinto de Agua (Eichhornia crassipes) para la síntesis de carboximetilcelulosa*. Revista Cubana de Química, 30(2), 211–221.
- [12] Trasande, L., DiGangi, J., Evers, D. C., Petrlik, J., Buck, D. G., Šamánek, J., Beeler, B., Turnquist, M. A., & Regan, K. (2016). *Economic implications of mercury exposure in the context of the global mercury treaty: Hair mercury levels and estimated lost economic productivity in selected developing countries*. Journal of Environmental Management, 183, 229–235.
- [13] Xu, W., Jin, Y., & Zeng, G. (2024). *Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: a review on source, toxicity and remediation methods*. Green Chemistry Letters and Reviews, 17(1), 1–25.
- [14] Zaynab, M., Al-yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., Ali, K., & Li, S. (2022). *Health and environmental effects of heavy metals*. Journal of King Saud University - Science, 34(1), 101653.