

Fitorremediación y biogás: un enfoque integral para la sostenibilidad del agua

Phytoremediation and biogas: a comprehensive approach to water sustainability

Euclides Deago^{1,3,4*}, Kairós Chung^{1,2}, Sara Patiño^{1,2}, Marian Ramirez¹, Arthur James^{1,3}

¹Grupo de Investigación Biosólidos: Energía y Sostenibilidad (BioES), Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá. ²Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá. ³Sistema Nacional de Investigación (SNI). ⁴Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT-AIP)

*Autor de correspondencia: Euclides.deago@utp.ac.pa

RESUMEN. La fitorremediación de plantas acuáticas es una tecnología para la biorremediación de aguas contaminadas que se presenta como una alternativa económica y eficaz en la extracción de contaminantes. De la gran diversidad de la flora panameña, se resalta la *Lemna Minor* por su capacidad de retención de metales pesados y como biomasa para la generación de biogás. Debido a esto, se propone un bio-tratamiento de aguas residuales para la industria minera, implementando la fitorremediación para absorber los residuos de mercurio (Hg) generados en su proceso y la codigestión anaeróbica posterior a la extracción de mercurio para la cogeneración de energía. La revisión bibliográfica sobre la capacidad de absorción de mercurio en la *Lemna Minor* y los datos recolectados en el laboratorio permitió definir parámetros, obteniendo como resultados la tasa de reproducción de la planta $PA=7.78 \text{ g/m}^2/\text{h}$, tasa de absorción de mercurio por unidad de masa de Lemna $C_{Hg\text{lemna}}=0.28\mu\text{g}/(\text{g h})$ y el rendimiento para la producción de metano mínimo bajo toxicidad de metales pesados en Lemna, $PBM=132 \text{ L/kg}$.

Se consideraron condiciones extremas de concentraciones de mercurio encontradas en regiones mineras de Asia de $103 \mu\text{g/L}$ en el que Posada & Arroyave Maya, 2006, comprobaron que bajo estas condiciones la tasa de reproducción de *Lemna Minor* no se ve afectada. Obteniendo un área necesaria para el tratamiento de estas condiciones de 15.21 hectáreas y un subproducto para la cogeneración de la planta mediante la implementación de codigestión anaeróbica de 156 228 L/h biogás.

Palabras clave. Biogás, codigestión anaeróbica, fitorremediación, lemma minor, metales pesados, prueba PBM

ABSTRACT. Phytoremediation of aquatic plants is a technology for the bioremediation of contaminated waters that is presented as an economical and effective alternative in the extraction of contaminants. Of the great diversity of Panamanian flora, *Lemna Minor* stands out for its capacity to retain heavy metals and as biomass for the generation of biogas. Due to this, a bio-treatment of wastewater is proposed for the mining industry, implementing phytoremediation to absorb the mercury (Hg) residues generated in its process and anaerobic co-digestion after the extraction of mercury for energy cogeneration. The bibliographic review on the mercury absorption capacity in *Lemna Minor* and the data collected in the laboratory allowed defining parameters, obtaining as results the reproduction rate of the plant $PA=7.78 \text{ g/m}^2/\text{h}$, absorption rate of mercury per unit mass of Lemna $C_{Hg\text{lemna}}=0.28\mu\text{g}/(\text{g h})$ and the yield for minimum methane production under heavy metal toxicity in Lemna, $PBM=132 \text{ L/kg}$.

Extreme conditions of mercury concentrations found in mining regions of Asia of $103 \mu\text{g/L}$ were considered in which Posada & Arroyave Maya, 2006, verified that under these conditions the reproduction rate of *Lemna Minor* is not affected. Obtaining an area necessary for the treatment of these conditions of 15.21 hectáreas and a subproduct for the cogeneration of the plant through the implementation of anaerobic co-digestion of 156 228 L/h biogas.

Keywords. Biogas, anaerobic codigestion, phytoremediation, lemma minor, heavy metals, PBM test

1. Introducción

La producción de energía limpia y sostenible y la conservación de las cuencas hidrográficas es sin duda

Citación: E.Deago, K. Chung, S. Patiño, M. Ramírez y A. James., "Fitorremediación y biogás: un enfoque integral para la sostenibilidad del agua", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 2, pp. (0), 2024.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 17 de noviembre de 2023. **Recibido con correcciones:** 20 de febrero de 2024. **Aceptado:** 20 de febrero de 2024.

DOI.

Copyright: 2024 E.Deago, K. Chung, S. Patiño, M. Ramírez y A. James, This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

parte fundamental en el desarrollo de una nación. Por esta razón, mediante el decreto ejecutivo número 393 del 14 de septiembre del 2015 fue adoptado en Panamá, los objetivos desarrollo sostenible, a través del plan energético Nacional con visión de estado en el cual describe la sostenibilidad ambiental como uno de sus objetivos meta para el 2030, así también se implementó el Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050, este busca salvaguardar la calidad de vida y el aprovechamiento de las cuencas hídricas del país [1].

Pese a esto, la contaminación del agua se ha vuelto una problemática principal en zonas que comparten varias actividades económicas en Panamá, esto según el informe de monitoreo de la calidad de agua en las cuencas hidrográficas de Panamá (2002-2008) que en el año de su publicación y posteriores informes recalcan la agravante problemática de las fuentes hídricas en la región metropolitana. La naturaleza de estos contaminantes puede variar dependiendo de la industria, por lo que es necesaria la implementación de sistemas de tratamiento de aguas industriales para tratar correctamente esta problemática. Esta solución representa un gran costo en industrias que presentan contaminantes como los metales pesados o hidrocarburos pues su tratamiento es considerado terciario y poco convencional.

La fitorremediación de plantas acuáticas se presenta como una alternativa económica respecto a los métodos convencionales y con altos parámetros de extracción de contaminantes. Esta es una tecnología que se basa en el uso de plantas para reducir en el agua la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, solo con los procesos usuales bioquímicos de la planta ([2], [3]).

A su vez, existe un gran recurso energético al aprovechar el potencial de estas plantas acuáticas como fuente de biomasa de segunda generación o no comestible para la producción de biogás de alto valor ofreciendo una alternativa de energía renovable. La materia prima que ofrece esta generación de biomasa se encuentra en abundancia y a gastos mínimos asociados a su recolección y transporte que en ciertas ocasiones es beneficioso ubicar las plantas de bioconversión cerca de la fuente de biomasa ([4],[5],[6]).

La digestión anaeróbica es un tratamiento de conversión de biomasa, genera dos subproductos de interés energético y agrícola, el primero biogás con un

alto potencial energético debido a la presencia de metano (CH_4) en la mayoría de su composición porcentual (60-70%), el gas resultante pueden ser tratado bajo la selectividad de metano; el segundo es el material digerido o lodo resultante con un gran potencial agrícola debido a disponibilidad de los nutrientes generados [7].

La codigestión anaeróbica se presenta como una variante de este proceso adaptable al tipo de materia prima disponible en Panamá. Siendo este un proceso biológico susceptible ante las características de la materia prima a tratar, definida como sustrato a lo largo de este texto, la concentración y composición del sustrato pueden ocasionar o no fenómenos que influyen sobre el metabolismo de los microorganismos presentes en el inóculo, el mismo debe ser de fácil adquisición y preferiblemente activo, reduciendo el tiempo para la estabilización de los sustratos, siendo el mejor candidato los lodos de digestión de Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ([8],[9]).

La sinergia entre la fitorremediación y la codigestión anaeróbica utilizando plantas acuáticas puede aportar beneficios importantes como el tratamiento de aguas, el mejoramiento de la calidad de vida de la población y la generación de energía limpia y sostenible, promoviendo así un enfoque para abordar los desafíos ambientales y energéticos en Panamá.

El objetivo principal de este trabajo es plantear la implementación de un sistema integral para la retención de contaminantes, con capacidad para la cogeneración energética mediante la implementación de la codigestión anaeróbica de plantas fitorremediadoras, enfocado en su aplicación en PTAR industriales, con el propósito de mejorar la calidad del agua de áreas urbanas que comparten fuentes hídricas con zonas industriales, una problemática común en la ciudad de Panamá. En esta investigación se presenta una revisión bibliográfica sobre la disponibilidad de plantas fitorremediadoras con capacidad para absorber metales pesados en Panamá, además, se realizaron pruebas de codigestión anaeróbica para conocer la producción de metano de la *Lemna minor* y el planteamiento para el funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas en una actividad industrial crítica.

2. Materiales y métodos

Mediante revisión bibliográfica se buscó responder 3 preguntas preliminares de investigación, P₁, P₂, P₃, respectivamente enfocadas a:

- **P₁: ¿Qué especies fitorremediadoras están presentes en Panamá?**
- **P₂: ¿Cuál es la capacidad de absorción de la planta fitorremediadora?**
- **P₃: ¿Logran reproducirse bajo condiciones de contaminación y así mantener la sostenibilidad del tratamiento?**

Para responder a P₁ se realizó un compendio de un listado de plantas aplicadas en tecnologías HAF (Humedales Artificiales Flotantes) ([10],[11]) y su disponibilidad en la república de Panamá según el Smithsonian Tropical Research Institute.

P₂ y P₃ se limitaron a la planta fitorremediadora seleccionada de la sección anterior, por cumplir con los siguientes factores:

- La planta debe ser tolerante a altas concentraciones de metales y debe ser acumuladora de estos.
- Debe tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Las plantas deben ser especies locales.
- Ser fácilmente cosechables [12].

Habiendo respondido estas preguntas preliminares y seleccionada la biomasa a aprovechar se inició el proceso de prueba preliminar para la codigestión anaeróbica de la planta fitorremediadora seleccionada.

2.1. Recolección y preparación de la biomasa

La *Lemna minor* fue recolectada en la cuenca del Canal, Puerto Limón, provincia de Colón; se empleó un medio de transporte acuático para su recolección utilizando mallas, como se presenta en la figura 1 (a).

La *Lemna minor* fue pretratada bajo licuado utilizando una licuadora (Oster, 465-15, México).



Figura 1. Obtención de la *Lemna minor* y tratamiento aplicado. (a) recolección, (b) pretratamiento.

2.2. Caracterización fisicoquímica

Se realizó un análisis gravimétrico por método de volatilización en un horno (J.P. SELECTA, s.a., 2001245, España) a 110°C para conocer la cantidad de humedad de la biomasa y a 550°C para cuantificar los sólidos volátiles (SV) y así poder definir las relaciones de inóculo-sustrato a utilizar en base a los porcentajes de SV obtenidos. Los valores obtenidos posteriormente fueron utilizados para la relación inóculo-sustrato.

2.3. Mezcla inóculo: sustrato

Dada la experiencia obtenida en investigaciones anteriores, la relación más utilizada suele ser de dos partes de sustrato por unidad de inóculo [7], habiendo considerado una relación se corroboró con los datos arrojados de sólidos volátiles, procurando la mayor disponibilidad de SV posible, relacionando el contenido de SV y el volumen a implementar en las mezclas mediante la ecuación (1) que define el volumen de sustrato, la ecuación (2) que define el volumen inóculo y la ecuación (3) que indica el contenido porcentual de sólidos volátiles en el volumen a utilizar [13]

$$V_S = V * \frac{I_{SV}}{(ISR * S_{SSV}) + I_{SV}} \quad (1)$$

$$V_I = V - V_S \quad (2)$$

$$C = \frac{V_I * I_{SV} + V_S * I_{SV}}{V_I + V_S} \quad (3)$$

Donde V_s es el volumen de sustrato, V el volumen útil, I_{SV} sólidos volátiles presentes en el inóculo, ISR como la relación inóculo-sustrato a utilizar, S_{SSV} los sólidos volátiles en el sustrato, V_I el volumen del inóculo y C el contenido de SV en el reactor (%).

2.4. Puesta en marcha de los reactores

Para la medición de biogás generado en la digestión anaerobia, los métodos volumétricos y manométricos son los más utilizados en los ensayos de PBM [14]. El método manométrico consiste en la medición y monitoreo del aumento de presión que se ejerce sobre un reactor debido a la producción de biogás producto de la digestión anaerobia [15].

Para este experimento se aplicó el método manométrico, debido a la disponibilidad de reactores y del equipo OxiTop®, así como del analizador de datos. Estos equipos cuentan con un recipiente de vidrio de 250mL equipado con un transductor de presión que se

ubica en el cabezal de medición instalado en la boca de la botella, además, cuenta con dos aberturas laterales selladas con un septum de goma, en el espacio del cabezal de los reactores, se colocan perlas de NaOH 1N para capturar el CO₂ presente en el biogás, por lo que el aumento de presión medido será únicamente de metano, permitiendo así cuantificar la cantidad de metano generado [15].

Para una mayor confiabilidad y un mejor análisis estadístico, el número de replicas debe ser al menos dos, por lo que este experimento se realizó por duplicado tanto para el inóculo como para la mezcla inóculo/sustrato. Para la preparación de los reactores se vertieron en cada recipiente la mezcla de 100 mL de volumen útil, dejando un volumen de espacio de cabeza de 150 mL para el almacenamiento de biogás. Los reactores de la mezcla inóculo-sustrato están compuestos por sustrato, agua destilada y lodos digeridos de PTAR de Juan Díaz, Panamá, a diferencia de los reactores de control que están compuestos únicamente por el inóculo y agua destilada; donde el control se utiliza para determinar el metano que es generado por inóculo, el cual debe ser restado de cada replica para obtener únicamente el metano producido por el sustrato [15].

Antes de cerrar los reactores, se utilizó un medidor de pH (Hach®, HQ Series Multi, Estados Unidos, Iowa) para revisar que el pH inicial de los sustratos y el inóculo se encuentren dentro de los límites permisibles para el metabolismo de las bacterias, estos límites van desde 6.5 a 8.2, ver figura 2. Además de colocar las perlas de NaOH, se procedió a eliminar el oxígeno dentro de los reactores con un gas inerte (N₂) ([16],[7]).



Figura 2. Medición de pH para los reactores al inicio.

Los reactores fueron colocados en una incubadora durante 5 días y se realizaron mediciones cada 24 h. Los mismos se encontraban bajo temperaturas constantes de

35°C para facilitar la digestión y reproducción microbiana [15], como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Puesta en marcha de los reactores en la incubadora.

A pesar de que los reactores cuentan con un sistema de mezclado que permite la homogeneidad de la mezcla inóculo-sustrato asegurando así las condiciones ideales para la digestión, se realizó una agitación manual todos los días para una mayor eficiencia de mezclado [7].

Es importante señalar que es necesario mantener controlado el pH en cada reactor, ya que a medida que avanza la digestión y ocurren los cambios de fases, estos pueden aumentar o disminuir el pH, lo que podría causar una inhibición de las actividades bacterianas [16]. Para el control se utilizan soluciones como HCl 1N para disminuir y NaHCO₃ al 4.0% para aumentar el pH.

3. Resultado y discusión

La diversidad de la flora panameña permite el planteamiento de la implementación de un gran número de especies acuáticas en el territorio nacional, pese a esto, hasta el momento de la redacción de este documento no existen inventarios de plantas acuáticas con capacidades fitorremediadoras en la tabla 1. se presentan un compendio de plantas aplicadas en tecnología de HAF (Humedales Artificiales Flotantes) y su disponibilidad en la región según el Smithsonian Tropical Research Institute.

Tabla 1. Especies de plantas acuáticas utilizadas para TAR y su disponibilidad en Panamá

Planta (Familia: especies)	Tipo de tratamiento	En inventario panameño (sí/no)
<i>Araceae:</i> • <i>Lemna gibba</i>	Aguas residuales (1,4-dioxano)	No
• <i>Lemna minor</i>	Aguas residuales, metales (Cd, Cu, Cr, Pb, Ni)	Sí

• <i>Pistia stratiotes</i>	Arsenito y metales (iones de Cu, Fe y Hg)	Si
<i>Alismataceae:</i> • <i>Alisma lanceolatum</i>	Efluentes industriales (metales pesados)	No
<i>Cyperaceae:</i> • <i>Carex apressa</i>	Escorrentía	No
• <i>Carex cuprina</i>	Metales pesados	No
• <i>Cyperus altemifolius</i>	Atrazina, flúor	No
<i>Iridaceae</i> • <i>Iris versicolor</i>	Nitrógeno y sedimentos	No
<i>Juncaceae:</i> • <i>Juncus effusus</i>	Nitrógeno y sedimentos	No
<i>Poaceae:</i> • <i>Brachiaria mutica</i>	Aguas residuales	No
• <i>Bambusa vulgans</i>	Fitodesalinización	Si
• <i>Phragmites australis</i>	Metales pesados y Fenol	Si
<i>Pontederiaceae:</i> • <i>Eicchomia crassipes</i>	Eutrotización	No
<i>Salviniaceae:</i> • <i>Salvinia molesta</i>	Secundario: agua residual domestica	No

Fuente: Smithsonian Tropical Research Institute [9]

De estas especies disponibles resalta la subespecie *Lemna minor*, una de las plantas disponibles en la región con una distribución especialmente en ambientes tropicales y subtropicales. En su composición química se observa un gran porcentaje de agua, proteína y posee un alto contenido de celulosa y hemicelulosa; es una planta que logra adaptarse muy bien a los ambientes acuáticos altos en nutrientes en un amplio rango de pH (3-10) con un valor óptimo de 6.2, con una tasa reproductiva entre 0.1 y 0.5 d⁻¹ una de las tasas de crecimiento más altas en el mundo debido a esto es considerada una plaga al invadir lagunas y generar diversas problemáticas ambientales y sociales; sin embargo, si se logra manejar adecuadamente se convierte es una materia prima atractiva para el tratamiento de aguas residuales debido a su nulo costo de adquisición y su alta disponibilidad [2].

Precisamente, la *Lemna minor* está siendo implementadas en pruebas industriales para el tratamiento de aguas residuales y su posterior aprovechamiento en proyectos como *Lemna Life* y *Petro Algae*. En ambos casos de estudio (uno ubicado en

España y otro en Chile), se enfocaban principalmente en el aprovechamiento como alimento porcino debido a la alta cantidad de proteínas disponibles en la especie.

El proyecto español *Lemna Life* con un sistema de 250 m² de cultivo de *Lemna* trata alrededor de 3000L/día de aguas residuales provenientes del digestato, su papel en el tratamiento de estas aguas residuales tiene como resultado la remoción de 2.7 t/ha-año de Nitrógeno y 1.2 t/ha- año de Fósforo, generado en el proceso más de 35 kg/día de esta biomasa. En cuanto al crecimiento de la planta tienen una capacidad de duplicación de 2 días con 16 h [17].

Una de las características de la biomasa (como sustrato) más importantes es el porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina presente en el sustrato, característica que puede definir la capacidad de digestión del sistema por lo tanto la reproducción del inóculo. Para la *Lemna minor*, tenemos una cantidad de lignina reducida (11.90 g/100g) debido a que no cuenta con tallos o un tronco en su estructura, disponiendo de una cantidad de celulosa (11.51 g/100g) y hemicelulosa (8.17 g/100g) accesible [18], por lo que podría utilizarse por completo.

Si bien los proyectos propuestos no engloban específicamente el funcionamiento propuesto, reafirman la capacidad de tratamiento de aguas residuales de la especie *Lemna* y su capacidad de ser implementada en procesos a gran escala en donde son extraídas para su posterior uso.

3.1 Capacidad de absorción de la *Lemna minor*

La capacidad de retención es importante ya que esta nos indica la capacidad de la planta de absorber metales pesados, lo cual es importante a la hora de determinar su uso como planta fitorremediadora. La efectividad de la fitorremediación se deberá principalmente a la capacidad de absorción de la planta seleccionada con respecto al contaminante ambiental presente en el medio. [11]. La *Lemna minor* es una planta hiperacumuladora, tiene alta capacidad de acumulación de metales pesados como Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Mercurio (Hg) [2].

A través En un estudio realizado por la Universidad Tecnológica de Panamá, se investigó la capacidad de retención de la planta *Lemna Minor*, sabiendo que esta tiene alta capacidad de retención y por ende alta eficiencia de remoción de contaminantes y nutrientes, la tabla 2 se muestra a continuación.

Tabla 2. Estudios sobre fitorremediación utilizando la *Lemna Minor*.

Sustancias	Tiempo de experimento	Porcentaje de remoción
Methylene blue (tinte azul)	24 horas	80.56 ± 0.44%
Nutrientes	30 días	Amoniaco nitrogenado total:41% Fósforo total: 37.80% Sólidos totales suspendidos: 81.11%
Zinc (Zn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Cobre (Cu), níquel (Ni)	15 días	Cu: 91% Zn: 83% Pb: 78% Fe: 77% Ni: 76%
Cadmio (Cd)	22 días	42–78%
Arsénico (As)	22 días	70%
Plomo acuoso	7 días	95%
Cloruro y sulfato	21 días	Cloruro: 30% Sulfato: 16%
Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Níquel (Ni)	31 días	Cd: 94.7% Cu: 94.5% Pb: 97.4% Ni: 99%

Fuente: (Bustamante, González, Solano, et al., 2022) [10].

Otros estudios enfocados en la remoción de mercurio obtuvieron como resultados que las concentraciones de mercurio fueron en promedio 40 µg por gramo de peso seco de tejido vegetal de la *Lemna minor* con una eficiencia de 20% al 30%. El periodo de máxima eficiencia de remoción de la *Lemna minor* ocurre durante los primeros 6 días, presentando una alta remoción de mercurio en aguas contaminadas hasta un nivel de 0.13 mg/L ([19],[20]).

3.2 Evaluación preliminar de codigestión anaeróbica de *Lemna minor*

La caracterización fisicoquímica de la biomasa nos permite conocer el porcentaje de sólidos volátiles y el contenido de humedad en cada una de las muestra, el porcentaje de humedad nos permite conocer la homogeneidad resultante de las mezclas, en donde la *Lemna minor* y el lodo digerido cuentan con un gran contenido de humedad, como muestra la tabla 3, por lo

que logró tener características homogéneas durante el funcionamiento del estudio. La tabla muestra el contenido de sólidos volátiles (SV), la humedad (H) y la desviación estándar (DE)

Tabla 3. Característica fisicoquímica de la biomasa

Biomasa	SV (%)	SV(g/L)	H (%)
Lodos	76.1117	1.408	99.5776
DE	1.4959	0.1387	0.0089
<i>Lemna</i>	75.4016	2.2853	99.5663
DE	0.5513	0.0500	0.0135

Después de obtener el contenido de sólidos volátiles y la relación inóculo/sustrato mostrado en la tabla 4, se optó por la configuración 2:1 (dos partes de sustrato por una de inóculo) para ser utilizada en los reactores, procurando así la mayor disponibilidad de sólidos volátiles.

Tabla 4. Relaciones de inóculo/sustrato. Donde L se refiere a *Lemna minor* y

	LD a lodos digeridos	
	Control	L + LD
1:1	7.92	12.85
2:1	35.17	38.46

En cuanto al Potencial Bioquímico de Metano (PBM), las lecturas obtenidas impiden el desarrollo de cálculos en cuanto a este parámetro, ya que las lecturas de mayor capacidad se encuentran en un nivel menor al control. Se infiere que el tiempo preliminar de digestión en los reactores L+LD de al menos 7 días en sistemas de prueba (por lo tanto, inestables), pudo afectar la cantidad de nutrientes disponibles y la variedad biológica presente en el digestato. La *Lemna* tuvo un comportamiento considerable frente al control utilizado que contaba con 2 días de inicio de digestión en los reactores de prueba, como se muestra en la figura 5, donde también deja a entrever características de arranque y estabilización muy similares y hasta superiores en *Lemna* 1 en las primeras 24 horas del inicio de la digestión en los reactores con sistema OxiTop.

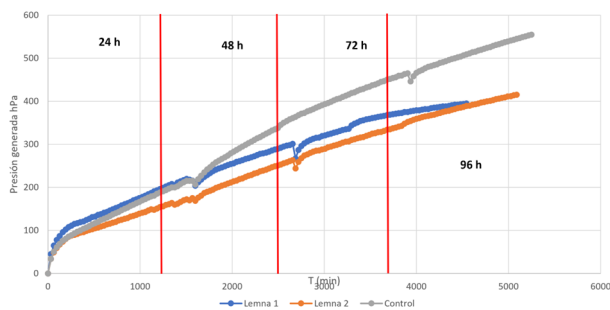


Figura 5. Comportamiento de la generación de biometano con respecto al tiempo ($P_{generada}$ vs T).

Los valores de pH obtenidos tanto al inicio como al final de la codigestión resultaron estar cercanas al rango de funcionamiento (6.5 a 8.2) en donde el rango óptimo es de 7.0 y 7.2, los valores por encima de 8.0 se debe a la presencia de las bacterias metanogénicas [16] como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de pH obtenidos a lo largo de la codigestión

	pH inicial	pH final
Control	7.40	8.71
L + LD (1)	7.23	8.99
L + LD (2)	7.18	9.08

Estos resultados indican que es posible la codigestión anaerobia de *Lemna minor* en especial para las condiciones de digestión “sólida”, en el que está disponible una mayor carga biológica y es posible la inhibición completa del proceso.

3.3 Funcionamiento en ambientes contaminados

La productividad de esta planta dependerá de las capacidades de desarrollo, reproducción y digestibilidad de la *Lemna minor* al estar expuesta a los ambientes que se buscan remediar. Así la tabla 6 enmarca resultados obtenidos en condiciones de contaminación por metales pesados.

Tabla 6. Comportamiento de la *lemna* en ambientes contaminados

Descripción	Autor/Referencia
El experimento arroja como resultado que las concentraciones de mercurio fueron en promedio 40 μg por gramo de peso seco de tejido vegetal de la <i>Lemna minor</i> . El periodo de máxima eficiencia de remoción de la <i>Lemna minor</i> ocurre durante los primeros 6 días, presentando una alta remoción de	[20]

mercurio en aguas contaminadas hasta un nivel de 0.13 mg/L.	
Se observó que el cadmio y el níquel mostraron resultados favorables sobre la tasa de producción de biogás como el contenido de metano. El porcentaje de absorción de metales pesados por estas dos plantas fue más alto cuando su concentración inicial en solución fue de 1.0 mg/L, en comparación con las muestras de 4.0 mg/litro y 8.0 mg/L. La presencia de un ion metálico en soluciones disminuyó la tasa de absorción del otro, en el caso del cadmio: 159 $\mu\text{g/g}$ y 127 $\mu\text{g/g}$; para el plomo 155 $\mu\text{g/g}$ y 141 $\mu\text{g/g}$. El hierro y el manganeso no tiene ningún efecto tóxico en la fermentación de Azolla y Lemna, pero el cobre, cobalto, plomo y zinc muestran toxicidad.	[21]
Los resultados experimentales de laboratorio mostraron que la planta es buen acumulador de Cd, Se, y Cu, un acumulador moderado de Cr, y pobre acumulador de Ni y Pb. Las concentraciones más altas de cada elemento acumulados en los tejidos de <i>Lemna Minor</i> fueron 13.3 g Cd/kg, 1.79 g Ni/kg, 4.27 g Se/kg, 3.36 g Cu/kg, 2.87 g Cr/kg y 0.63 g Pb/kg.	[22]
La capacidad de absorción de la planta al mercurio en el agua fue de 24.6% en la medición más baja y de 26.1% en la medición más alta. En la planta se observó un proceso de clorosis.	[2]

3.3.1 Inhibición por metales pesados

Las bacterias metanogénicas pueden presentar inhibición tipo reversible ante la presencia de metales pesados, algunas investigaciones acerca de esto señalan que el proceso de digestión se ve vulnerable siempre y cuando se encuentren altas concentraciones de metales pesados [23]. En la tabla 7 se puede observar los niveles máximos de concentración de metales pesados en el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 7. Concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia.

Metal	Concentración de inhibición (mg/L)	Límite de toxicidad (mg/L)
Cr (III)	130	260
Cr (VI)	110	420

Cu	40	70
Ni	10	30
Cd	-	>20
Pb	340	>340
Zn	400	600

Fuente: Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje [24].

Otras investigaciones que evidencian bajas concentraciones de metales pesados en las biomásas utilizadas para la codigestión anaeróbica, afirman que esos valores que se presentan en la tabla 8 descartan la posibilidad de inhibición de las bacterias en presencia de metales pesados [25].

Tabla 8. Resultados metales pesados obtenidos en las muestras [25].

Parámetros	Actividades económicas			COPANIT 47-2000	
	Avícola	Comercial	Hotelera	Tabla 3.1	Tabla 3.2
Coliformes Fecales (UFC/g)	2.8x108	1.2x104	1.1x105	2000	2000
As (mg/kg)	<0.001	<0.001	2.6	75	40
Cr (mg/kg)	4,070	15.8	7.4	3000	1500
Cd (mg/kg)	<0.001	1.1	0.365	85	40
Cu (mg/kg)	33.6	425	1390	4300	1500
Hg (mg/kg)	<0.001	<0.001	<0.001	57	25
Mo (mg/kg)	0.414	5.11	1.41	75	25
Ni (mg/kg)	5,540	156	30.6	420	420
Pb (mg/kg)	1,530	31.6	3.35	840	300
Se (mg/kg)	3.84	<0.001	<0.001	100	50
Zn (mg/kg)	118	1090	551	7500	3000

Fuente: Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás [25].

Por lo tanto, el proceso de digestión anaeróbica no se ve afectado en bajas concentraciones de metales pesados, lo que implicaría que para el caso propuesto se tendría que cumplir y mantener con los límites máximos establecidos en la tabla 7 para no comprometer la producción de biogás.

Por otro lado, una investigación en Colombia acerca de la codigestión anaeróbica entre el estiércol de vaca y el jacinto de agua contaminado con mercurio (debido a que crece en ríos que circundan Magdalena, el Cauca y el San Jorge, los cuales sufren el impacto de la minería de oro), concluyeron que el mercurio no afecta significativamente la producción de metano durante el proceso de digestión anaeróbica, la producción de metano varió entre 38,9% y 59,8%, cuyos valores variaban dependiendo de la proporción de peso húmedo utilizado para el jacinto de agua y para el estiércol de vaca [26].

Los resultados indican que, incluso después de la digestión, se retiene una gran proporción de mercurio en

la biomasa, pero este hecho no parece tener un impacto negativo en la producción de metano [26].

Además, la investigación tenía como objetivo determinar que sucedía con el contaminante, por lo que se comparó la cantidad de mercurio en el sustrato antes y después del proceso de digestión, estos valores presentados indican que el mercurio total se mantiene en la biomasa aún después de la digestión anaeróbica con porcentajes encima de 80% [26].

3.3.2 Riesgos en la disposición de productos de la DA

Uno de los grandes retos en la implementación de estos ciclos es la contaminación residual presente en la biomasa digerida, por lo que se deben priorizar la reducción del volumen de los productos más contaminados. Uno de los caminos alternativos son los procesos de aprovechamiento termoquímicos de biomasa como la gasificación, esta sobre la combustión tiene la ventaja de aprovechar los gases generados en este proceso como parte de la cogeneración de la planta o el proceso, además, los metales presentes se quedarán dentro del porcentaje de cenizas generadas, creando la posibilidad de reciclar estos metales pesados del proceso industrial que los haya generado ([26],[27]).

3.4 Caso de estudio: minería en Panamá

La industria de la extracción de metales pesados, en específico el oro, debe contar con un sistema estricto de tratamiento de las aguas residuales generadas en el proceso industrial, según una publicación de la organización WWF de Colombia, para extraer un gramo de oro se deben utilizar hasta 1,000 litros de agua, por lo que el efluente generado no es algo que debe tomarse a la ligera, este efluente puede llegar a tener concentraciones (en casos extremos) de hasta 103.0 µg/L de mercurio disuelto en agua [28]. La fitorremediación con el uso de la especie *Lemna Minor* presenta buenos resultados con tiempos de retención de 6 días y una eficiencia de 20% -30% con una concentración absorbida en la planta de 40 µg/g de mercurio en masa de Lemna [20].

Según las condiciones descritas en el proyecto de Lemna Life, la producción de Lemna por unidad de área con un volumen restante efectivo de para la fitorremediación (PA) queda tal que:

$$PA = 17 \frac{\text{toneladas}}{250\text{m}^2 \text{ año}} = 0.068 \frac{T}{\text{m}^2 \text{ año}} = 7.78 \text{ g/m}^2\text{h} \quad (4)$$

La ecuación (4) representa la tasa de crecimiento de lemna por unidad de área.

Con la investigación de Arenas et al., 2011, definimos la tasa de absorción de mercurio por gramo de Lemna ($C_{Hg\text{lemna}}$) en un tiempo de 6 días (144h) y una cantidad de mercurio en masa de Lemna de 40 $\mu\text{g/g}$ queda tal que:

$$C_{Hg\text{lemna}} = \left(\frac{40\mu\text{g}}{\text{g}}\right)\left(\frac{1}{144\text{h}}\right) = \frac{0.28\mu\text{g}}{\text{g h}} \quad (5)$$

Siendo el caso de estudio la producción de oro de la empresa First Quantum, Panamá, con una producción reportada en el año 2021 de 4, 015, 341.41 g de oro y asumiendo el uso de 1,000 L de agua por cada gramo de oro, el flujo volumétrico de agua:

$$Q_{\text{minería}} = 4,015,341.41 \frac{\text{L}}{\text{año}} = 459,631.57 \text{L/h} \quad (6)$$

Y el flujo másico de contenido de mercurio con una concentración de 103 $\mu\text{g/L}$:

$$\dot{m}_{\text{Hg}} = \frac{103\mu\text{g}}{\text{L}} \left(459,631.57 \frac{\text{L}}{\text{h}}\right) = 47,342,051.71 \mu\text{g/h} \quad (7)$$

Con la ecuación (5) y la ecuación (7) se define la masa de Lemna (m_{lem}) necesaria para la absorción de este flujo másico de mercurio con un tiempo de retención de 6 días en el paso de fitorremediación.

$$m_{\text{lem}} = C_{Hg\text{lemna}}(\dot{m}_{\text{Hg}}) = 170,431,386.2 \text{ g Lemna} \quad (8)$$

El área necesaria para las piscinas de fitorremediación con un tiempo de retención de 6 días A_{planta} queda descrita en la ecuación (9)

$$A_{\text{planta}} = m_{\text{lem}}/PA = 152,127.41 \text{ m}^2 = 5.21 \text{ hectáreas} \quad (9)$$

Si bien representa una gran extensión de área, representa al menos la mitad de lo que comprende actualmente la planta de tratamiento de Juan Diaz, considerando que el flujo en este sector comercial y en específico de esta empresa representa un porcentaje importante de los valores económicos generados en el país es razonable la implementación de tratamientos de escalas considerables, además, con el planteamiento de la obtención de biogás como producto de este proceso para fuente de cogeneración representa una alternativa muy viable, en la ecuación (10) se presenta el potencial volumétrico de generación de biogás bajo los valores más

críticos de potencial bioquímico de metano en toxicidad de metales pesados de 132 L/kg [29].

$$V_{\text{biogas}} = 132 \frac{\text{L}}{\text{kg}} (m_{\text{lemna}}(\text{kg})) = 156,228 \frac{\text{L}}{\text{h}} \text{ biogas} \quad (10)$$

Pese a estas condiciones críticas consideradas, la reproducción de la *Lemna Minor* no se ve afectada bajo estas concentraciones (nocivas para la salud de otras especies) de mercurio si no es hasta 1mg/L de mercurio disuelto en agua [30].

4. Conclusiones

- El potencial bioquímico de producción de metano en la *Lemna minor* resulta ser prometedor considerando las condiciones no ideales dadas durante la prueba, por lo que será necesaria la repetición de esta.
- Los resultados obtenidos en cuanto la generación de metano impiden una conclusión respecto a capacidad de generación de biometano de forma cuantitativa, por lo que se recomienda la repetición del estudio para obtener replicabilidad.
- La Lemna minor, es conocida como una especie fitorremediadora, pues es una planta hiperacumuladora con alta capacidad de acumulación de metales pesados como Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Mercurio (Hg) [15], cuenta con un gran potencial para el desarrollo de procesos/ciclos sostenibles por su capacidad de reproducción ante aguas residuales industriales, en específico en las industrias mineras, con capacidad de cogeneración mediante la digestión anaerobia de la biomasa (*Lemna minor*) resultante del tratamiento de estas aguas para la producción de biogás, presentándose así como un camino hacia el tratamiento sostenible de aguas residuales industriales.
- Pese a esto, la proliferación de esta planta no deja de ser una problemática importante por lo que se deben realizar investigaciones futuras relacionadas en el desarrollo de las piscinas fitorremediadoras de esta especie para grandes masas de agua que impidan que sus semillas sean depositadas en el efluente. Además, en el diseño de esta se deben añadir los mecanismos de remoción de las unidades saturadas a una tasa constante relacionada con su reproducción

AGRADECIMIENTOS

Especiales al laboratorio del Centro de Investigación Hidráulica-Hidrotécnicas, nos consideramos honrados de la guía y experiencia recibida dentro de las instalaciones.

Al sistema nacional de investigación (SNI) de la SENACYT, república de Panamá, por su apoyo en la realización de este proyecto.

A las personas que ofrecieron su tiempo para la obtención de la materia prima utilizada en este proyecto como Darío Garibaldi que recolectó la biomasa de *Lemna minor* en la comunidad de puerto Limón, Colón.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

E.D: colaboró en la conceptualización del proyecto y revisión del artículo.

K.CH: colaboró en la conceptualización del proyecto, el trabajo de campo y laboratorio, en la recolección y análisis de datos y en la redacción del documento.

S.P: colaboró en el trabajo de laboratorio, en la recolección y análisis de datos y en la redacción del documento.

M.R: colaboró en el trabajo de laboratorio, en la recolección y análisis de datos.

A.J: colaboró en la conceptualización del proyecto y revisión del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] C. de la C. N. para el D. CCND, *Plan Estratégico Nacional con Visión de Estado*. 2014. [Online]. Available: [https://www.concertacion.org.pa/tmp/file/333/PEN2030_para Consulta.pdf](https://www.concertacion.org.pa/tmp/file/333/PEN2030_para%20Consulta.pdf)
- [2] E. Jaramillo, Mariuxi; 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.” *Univ. POLITÉCNICA Sales.*, p. 128, 2012.
- [3] G. A. Bortolotti and D. Baron, “Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach,” *Environ. Adv.*, vol. 8, no. February, p. 100204, 2022, doi: 10.1016/j.envadv.2022.100204.
- [4] D. Sánchez, “Planta acuática Lenteja de Agua se extiende en el Lago Gatún, daña motores,” 2019. [Online]. Available: <https://www.panamaamerica.com.pa/provincias/planta-acuatica-lenteja-de-agua-se-extiende-en-el-lago-gatun-dana-motores-1151316>
- [5] SNE, “Plan Energético Nacional 2015-2050,” 2016.
- [6] FAO, “Introducción a la dendroenergía. Colección Documentos Técnicos N.º 21.” Buenos Aires, 2020. doi: <https://doi.org/10.4060/cb0619es> Las.
- [7] L. M. Cárdenas Cleves, B. A. Parra Orobio, P. Torres Lozada, and C. H. Vásquez Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos,” *Rev. ION*, vol. 29, no. 1, pp. 95–108, Jun. 2016, doi: 10.18273/revion.v29n1-2016008.
- [8] B. A. Parra Orobio *et al.*, “Evaluación de lodos de PTAR municipales como inóculos en la digestión anaerobia de biorresiduos,” *Rev. ION*, vol. 29, no. 1, pp. 37–46, 2016, doi: 10.18273/revion.v29n1-2016003.
- [9] E. Deago *et al.*, “Optimizing Anaerobic Digestion at Ambient Temperatures: Energy Efficiency and Cost Reduction Potential in Panama,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 14, pp. 1–14, 2023, doi: 10.3390/w15142653.
- [10] D. M. Delvalle-Borrero, J. R. Medina, and K. Fuentes, “Humedales artificiales flotantes y su valor paisajístico en ríos urbanos - Ciudad de Panamá,” *Prism. Tecnológico*, vol. 13, no. 1, pp. 3–9, 2022, doi: 10.33412/pri.v13.1.2871.
- [11] A. Bustamante, M. González, A. I. Montero Solano, E. Valdivieso, and V. Domínguez, “Capacidad de fitorremediación de hierro de las lentejas de agua (*Lemna minor*) y la hydrilla (*Hydrilla verticillata*),” *Rev. Iniciación Científica*, vol. 8, no. 2, pp. 43–49, 2022, doi: 10.33412/rev-ric.v8.2.3671.
- [12] E. J. Nuñez López, Roberto Aurelio; Meas Vong, Yunny; Borges, Raúl Ortega; Olgúí, “Fitorremediación: fundamentos y Aplicaciones,” *Academia*, 2004, Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/53300541/Fitorremediacion-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1662503437&Signature=Zezfj82OzSNqCJxtUPY6hmWDvvpfE5ZyCMEMyK-2Ny1cx5b5N8rfsydrNG7c9lhPzbniiiqMvdFQ7FnjUC8B5i2asqpvRtRKvLW0~DY1k6v~uP7RnQ4mXABvQ~B2KY1WRP1leWN7~oF>
- [13] P. B. María, E. Beily, and D. Crespo, *Ensayo potencial bioquímico metanogénico Una metodología clave para conocer la energía de las biomásas*, no. March. 2022.
- [14] G. Esposito, L. Frunzo, A. Panico, and F. Pirozzi, “Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic

- Substrates,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 33, no. 24, pp. 2733–2740, 2012, doi: 10.1080/09593330.2012.676077.
- [15] M. Casallas-Ojeda, S. Meneses-Bejarano, R. Urueña-Argote, L. F. Marmolejo-Rebellón, and P. Torres-Lozada, “Techniques for Quantifying Methane Production Potential in the Anaerobic Digestion Process,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, no. 5, pp. 2493–2510, 2022, doi: 10.1007/s12649-021-01636-2.
- [16] V. Ortiz Jordá, “PUESTA A PUNTO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA (AME) DE UN FANGO ANAEROBIO MEDIANTE EL SISTEMA OXITOP®. INFLUENCIA DE LAS PRINCIPALES VARIABLES EXPERIMENTALES.” Universidad Politécnica de Valencia, 2011. [Online]. Available: <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15711/MEMORIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] Lemna life, “Layman’s Report 2020 LIFE LEMNA: Lemna culture technology to improve nutrient management and efficiency resource consumption in pig production systems,” 2020. [Online]. Available: <http://www.life-lemna.euprojectco-financedbylifeprogrammoftheeuropeancommission>
- [18] M. E. Carranco, R. M. Castillo, A. Escamilla, M. Martínez, F. Pérez-Gil, and E. Stephan, “Chemical composition, leaf protein extraction and amino acid profile of seven aquatic plants,” *Cuba. J. Agric. Sci.*, vol. 36, pp. 237–248, 2002.
- [19] B. McNeil and L. M. Harvey, *Practical fermentation technology*. Wiley, 2008.
- [20] A. D. Arenas, L. M. Marcó Parra, and G. Torres Sierralta, “Evaluation of the plant Lemna Minor for the bioremediation of water,” *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–11, 2011, [Online]. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3751198&info=resumen&idioma=ENG>
- [21] S. K. Jain, G. S. Gujral, N. K. Jha, and P. Vasudevan, “Production of biogas from *Azolla pinnata* R.Br and *Lemna minor* L.: Effect of heavy metal contamination,” *Bioresour. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 273–277, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90013-N).
- [22] C. Q. Salazar *et al.*, “LA LENTEJA DE AGUA (*Lemna minor* L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA *,” 2004.
- [23] A. M. González Cabrera, “Biogás digestor,” *Biogás Dig.*, pp. 22–36, 2014.
- [24] E. Campos, S. Agua, and X. Flotats, “Cap . 9 . Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje,” no. January 2004, 2018.
- [25] E. Deago, “Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020, doi: 10.33412/idt.v16.2.2831.
- [26] A. Borrego, “EICHHORNIA CRASSIPES CONTAMINADA CON MERCURIO COMO UN GENERADOR DE BIOGAS,” vol. 10, p. 6, 2021.
- [27] H. Du, M. Huang, Z. Zhang, and S. Cheng, “Genome-wide analysis of the AP2/ERF gene family in maize waterlogging stress response,” *Euphytica*, vol. 198, no. 1, pp. 115–126, 2014, doi: 10.1007/s10681-014-1088-2.
- [28] F. A. Diaz Arriaga, “Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano,” *Rev. Salud Pública*, vol. 16, no. 6, pp. 947–957, 2015, doi: 10.15446/rsap.v16n6.45406.
- [29] S. K. Jain, G. S. Gujral, N. K. Jha, and P. Vasudevan, “Production of biogas from *Azolla pinnata* R.Br and *Lemna minor* L.: Effect of heavy metal contamination,” *Bioresour. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 273–277, 1992, doi: 10.1016/0960-8524(92)90013-N.
- [30] M. I. Posada and M. del P. Arroyave Maya, “Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales,” *Rev. EIA*, pp. 57–67, 2006, [Online]. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=32930366&lang=es&site=ehost-live>