

Bioremediation with *Arthrospira* (*V. platensis* and *V. máximo*) for water contaminated with lead

Cruz-Oblitas José, estudiante¹; Basilio-Castillo Brandon, estudiante²; Escobar-Aspiros Stephanie, estudiante³; and Oblitas-Cruz Jimy, doctor⁴

¹Universidad Privada del Norte, N00305217@upn.pe; ²N00280354@upn.pe; ³ N00305189@upn.pe; ⁴ Jimy.oblitas@upn.edu.pe

Abstract—The present study was conducted with the aim of providing a solution to the high concentrations of lead in the upper basin of Moche River. To achieve this, two varieties of microalgae (*Arthrospira platensis* and *Arthrospira máximo*) were used in bioreactors with aeration adaptation. Lead determination was performed through atomic absorption spectroscopy, and data collection for the growth curve was based on the dry weight of biomass. The treatments were arranged in a 2x2 factorial design, and the growth curve was fitted to the Gompertz model. The experimental maximum growth rate was found to be for *Arthrospira platensis* without Aerator at 0.63417 ± 0.0644 , and the minimum was for *Arthrospira máximo* with Aerator at 0.47361 ± 0.06401 . The model achieved R2 values exceeding 0.95 in all treatments. The standardized effects of the two studied variables, the type of *Arthrospira*, and aeration were statistically significant ($p < 0.05$) in growth. In conclusion, there is technological viability in using cyanobacteria to efficiently reduce lead levels in Moche River.

Keywords— *Arthrospira platensis*, *Arthrospira máximo*, bioremediation, lead, Gompertz.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Biorremediación con *Arthrospira* (*V. platensis* y *V. máxima*) para aguas contaminadas con plomo

Cruz-Oblitas José, estudiante¹; Basilio-Castillo Brandon, estudiante²; Escobar-Aspiros Stephanie, estudiante³; and Oblitas-Cruz Jimy, doctor⁴

¹Universidad Privada del Norte, N00305217@upn.pe; ²N00280354@upn.pe; ³N00305189@upn.pe; ⁴Jimy.oblitas@upn.edu.pe

Resumen– El presente trabajo se realizó con la finalidad de ofrecer una solución a las altas concentraciones de plomo en la cuenca alta del río Moche. Para ello se usó 2 variedades de microalgas (*Arthrospira platensis* y *Arthrospira máxima*) en biorreactores con adaptación a aireación. La determinación del plomo se realizó por espectroscopía de absorción atómica y la toma de datos para la curva de crecimiento fue por peso seco de biomasa. Los tratamientos fueron en un arreglo factorial 2² y la curva de crecimiento se ajustó al modelo de Gompertz. Se obtuvo que la tasa de crecimiento máxima experimental obtenida corresponde a *Arthrospira Platensis* sin Aerador de 0.63417 ± 0.0644 y la menor correspondió a *Arthrospira Maximum* con Aerador con un valor de 0.47361 ± 0.06401 , el modelo obtuvo valores de R^2 superiores a 0.95 en todos los tratamientos. Los efectos estandarizados de las 2 variables estudiadas que son el tipo de *Arthrospira* y la aireación son estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en el crecimiento. Podemos concluir en que existe viabilidad tecnológica del uso de cianobacterias para reducir de manera eficiente los niveles de plomo del Río Moche.

Palabras Clave– *Arthrospira platensis*, *Arthrospira máxima*, biorremediación, plomo, Gompertz.

I. INTRODUCCIÓN

El avance industrial junto con el aumento poblacional que genera un alto consumismo, ha generado un aumento del consumo de agua con ello una gran cantidad de generación de aguas residuales [1]. Los residuos son de diferentes orígenes tanto biológicos, como el problema latente del lactosuero que genera diversas alternativas de solución usando alternativas biotecnológicas [2], [3]. Pero uno de los más complejos de resolver son los problemas ligados a contaminación con iones metálicos de diferentes industrias como es la minería.

La presencia de iones metálicos tóxicos como níquel, aluminio, plomo y cobre en agua o aguas residuales, incluso en concentraciones bajas, puede causar graves problemas de salud tanto para los organismos humanos como para los bióticos [4]. En este contexto el uso de las cianobacterias se presenta como biosorbentes prometedores para metales pesados en la biorremediación. Aunque se conoce el secuestro de metales por parte de cianobacterias, los mecanismos y ligandos implicados no se comprenden muy bien [5].

El proceso de eliminación de metales peligrosos en agua basado en microalgas ha surgido como un enfoque económico y renovable que posee bajos requisitos de energía, menos formación de lodos, secuestro de CO₂ y bajas emisiones de gases de efecto invernadero [6].

Se han propuesto varias tecnologías convencionales para eliminar el plomo de los ambientes acuáticos. Recientemente, la biosorción se ha propuesto como una alternativa emergente y de bajo costo basada en la sorción de contaminantes

disueltos sobre un biomaterial [7]. *Arthrospira platensis* a sido ampliamente estudiada y se ha demostrado que *A. platensis* absorbe Cu²⁺ [8]. Esta cianobacteria procarionta de las especies de microalgas, que tiene un alto contenido de proteínas, carbohidratos y grasas, puede interactuar con metales pesados a través de la biosorción/bioacumulación, lo que lleva a cambios en el rendimiento de la biomasa, la tasa de crecimiento e implícitamente, la composición de la biomasa.

La adsorción y absorción de iones metálicos por las algas puede verse afectada por factores extrínsecos, como la temperatura, el pH y los iones competitivos, así como por factores intrínsecos, como el tamaño celular, la forma, el sitio de unión, los tipos de orgánulos celulares, el peso/densidad de biomasa de algas y moléculas de unión a las paredes celulares. Grupos funcionales como hidroxilo, fosforilo, amino, carboxilo y sulfhidrilo se encuentran entre los mecanismos propuestos para la eliminación de iones metálicos. Los cationes metálicos tienden a unirse a estos grupos a través de interacciones electrostáticas basadas en cargas, y la variación del nivel de afinidad de los grupos funcionales puede afectar la eficacia de la eliminación [9]

Además, las microalgas crecen mixotróficamente y se adaptan fácilmente a condiciones ambientales adversas. La razón por la cual *Arthrospira platensis* y *Arthrospira máxima* es capaz de absorber metales pesados como el plomo, se debe a sus grupos carboxilos [5]. Las características de las microalgas así como su organización en el medio ambiente podrían afectar su capacidad de eliminación. Por ejemplo, en teoría, las formas unicelulares deberían exhibir mayores capacidades de eliminación porque poseen mayores áreas de superficie para el proceso de adsorción. Sin embargo, tienden a formar agregados celulares, lo que da como resultado la formación de biopelículas, que podrían cubrir algunas de las áreas de superficie [10].

El presente trabajo de investigación experimental se realiza con la finalidad de ofrecer una solución a un problema persistente durante los años el cual es la contaminación del río Moche (Trujillo – Perú). El Río Moche es una importante fuente de agua para la ciudad de Trujillo y sus alrededores. A pesar de ello, las actividades mineras y la falta de medios adecuados para la eliminación de residuos han provocado altas concentraciones de plomo en el agua de los ríos. Esto se debe principalmente a los desechos mineros y a las emisiones de las empresas mineras que operan en la zona [11], el cual afecta al ecosistema ocasionando daños en la flora y fauna de la zona, asimismo también ocasiona daños a los pobladores de zonas aledañas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Adaptación de *Arthrospira platensis* y *máximum*:

Arthrospira platensis

Para la adaptación al medio, se necesita 1 litro de agua que estará vertida en una botella de 2.5 litros; 10 gramos de sal sin yodo o mejor dicho sal industrial, ya que este tipo de cepa necesita que sea un medio un poco salado; 6 gramos de bicarbonato de sodio y semanalmente se tiene que dar 1 mL de fertilalga, ya que con esto dará los suficientes nutrientes para el medio. El tiempo de adaptación es de por lo menos 10 días.

Arthrospira máximum

Para la adaptación al medio, se necesita 1 litro de agua que estará vertida en una botella de 2.5 litros; 2 gramos de bicarbonato de sodio y semanalmente se tiene que dar 1 mL de fertilalga, ya que con esto dará los suficientes nutrientes para el medio. El tiempo de adaptación es de por lo menos 10 días.

B. Obtención de muestra de agua del río Moche

Población

La población de la Cuenca Hidrográfica del Río Moche comprende las Provincias de Trujillo, parte de Otuzco, Julcán y Santiago de Chuco

Diseño del muestreo

Para el desarrollo de este análisis se empleó el tipo de muestreo aleatorio simple, teniendo en cuenta todos los factores necesarios a fin de asegurar que las muestras optimas.

Obtención de la muestra

Se recolectó una muestra de agua de la parte de la cuenca alta del Río Moche (línea azul de la Figura 1), ubicado en el distrito de Otuzco, provincia Otuzco, Departamento de La Libertad.

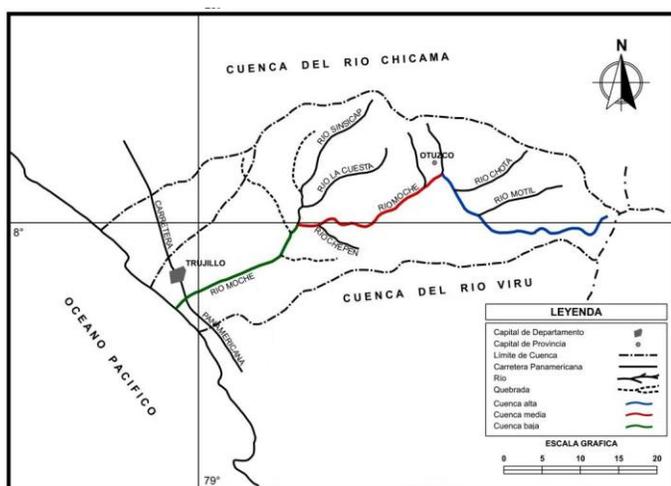


Fig. 1 Cuencas del Río Moche (Gráfico tomado y adaptado de INRENA-Perú)

Preparación de la muestra para identificar plomo por Espectroscopía de absorción atómica

- Para preparar un estándar patrón de plomo de 100 mg/L, se midió 10mL del estándar certificado de 1000 mg/L y se contuvo en una fiola de 100 ml, luego se enrazo con agua ultrapura.
- Se preparó un blanco de calibración con agua ultrapura, siguiendo el procedimiento anterior.
- Digestión ácida: Tomar un volumen de 50 mL de muestra de agua y depositarlo en un vaso de precipitación de 100 mL para luego agregar 5 mL de HNO₃ CC y llevar a plancha de calentamiento hasta evaporarse en un 80% del volumen inicial. Posterior a ello filtrar haciendo uso del equipo de filtración y depositarlo en una fiola de 50 mL y aforar con la solución de HNO₃ al 1%.
- Se tomó una alícuota de 10 mL de muestra para su lectura en el equipo de absorción atómica AGILENT 240FS.

C. Biorremediación:

Una vez obtenida la muestra de agua y pasen los 10 días del periodo de adaptación de la cianobacteria, se necesita poner 1.5 litros de agua del Río Moche y 500 mililitros de agua con la cianobacteria. Se procede a hacer ese procedimiento un total de 4 veces, quedando así que 2 tanques tienen la cepa *Arthrospira platensis* la cual uno de estos tanques tendrá un compresor de oxígeno que esté funcionando las 24 horas del día y otro no tendrá compresor de oxígeno, pero se tendrá que mover para que la cianobacteria no se quede al fondo. Los pasos serán los mismos para *Arthrospira máximum*.

Una vez instalado se procede a tomar las muestras, para esto necesitamos tubos de ensayo con tapa rosca. A las 24 horas de la instalación se procede a tomar la primera muestra de cada tanque, este procedimiento se repite en los siguientes 9 días para así completar los 10 días de toma de muestra.

La experiencia se realizó en pequeños tanques esto porque el cultivo en suspensión de células de algas y el tratamiento de contaminantes suelen utilizar un sistema de estanque abierto, que tiene las ventajas de una estructura simple, un bajo costo de inversión y es fácil de ampliar.

D. Peso de la biomasa:

Para determinar el peso de biomasa diario, se utilizó un filtrador y papel filtro, el papel filtro fue llevado a una balanza analítica para saber el peso inicial, luego se lo marca para saber de cuál es la muestra, se instala en el filtrador y se pone la muestra, para evitar que la muestra se seque solo se prendió el filtrador 3 segundos, después de eso el papel filtro se pone en un crisol y lo llevamos a la estufa eléctrica para quitar toda

la humedad presente, para posteriormente pesar nuevamente el papel filtro.

E. Determinación del porcentaje de remoción de plomo.

Para este fin se usó la ecuación siguiente:

$$Remoción (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

C_i= Medida inicial de la concentración de plomo en la muestra sin tratar.

C_f= Medida final de la concentración de plomo en la muestra tratada.

F. Análisis estadístico y ajuste a modelo de crecimiento celular

Se realizó un análisis de regresión no lineal para el ajuste del modelo cinético en las cepas de microalgas investigadas. Se utilizará el modelo de Gompertz el cual se utiliza para estudiar la cinética de crecimiento de microorganismos. La ecuación siguiente representa al modelo usado:

$$y = ae^{-\exp(-k(x-x_c))}$$

Donde a es la biomasa máxima, k representa la tasa de crecimiento relativa en el momento Xc; y Xc es el momento en el que las cepas de algas alcanzan la tasa máxima de crecimiento (en días). Los valores de los coeficientes a, Xc y k se encuentran en función de los datos de medición experimentales y mediante análisis de regresión no lineal.

Para la comparación de tratamiento se hará una prueba de comparación múltiple de Tukey y para la significancia se lo tratará como un modelo factorial del tipo 2².

III. RESULTADOS

A. Crecimiento de las microalgas y ajuste a modelo de Gompertz

La figura 2 muestra las curvas de ajuste de crecimiento para los 4 tratamientos analizados, se aprecia que el cultivo presentó una curva de crecimiento sigmoidea clásica. Se produjo una fase de retraso durante el primer día, luego, se obtuvo una fase típicamente exponencial entre el crecimiento del día 2 y 5, seguida de una meseta donde el crecimiento alcanza su máximo.

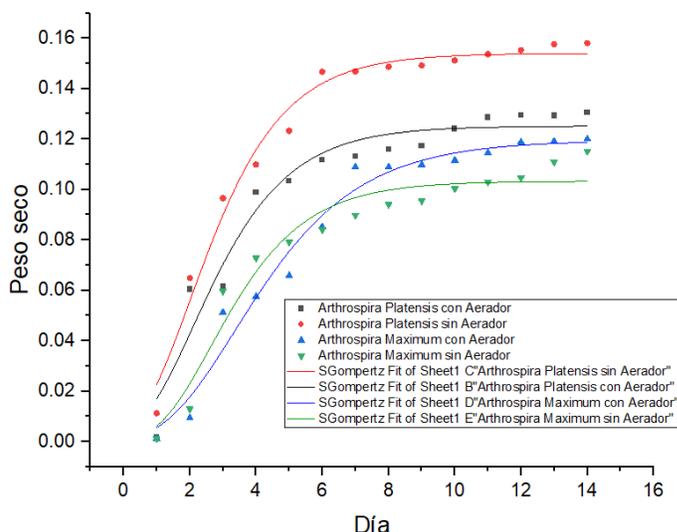


Fig. 2 Ajustes de Gompertz a las curvas de crecimiento de las microalgas

La tasa de crecimiento máxima experimental obtenida corresponde a *Arthrospira Platenis* sin Aerador de 0.63417±0.0644 y la menor correspondió a *Arthrospira Maximum* con Aerador con un valor de 0.47361±0.06401.

La identificación de los parámetros del modelo Gompertz utilizado y los coeficientes estadísticos se presentan en la Tabla I, es interesante observar que este modelo obtuvo valores de R² superiores a 0.95 en todos los tratamientos.

TABLA I
PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE GOMPERTZ

	Arthrospira Platenis con Aerador	Arthrospira Platenis sin Aerador	Arthrospira Maximum con Aerador	Arthrospira Maximum sin Aerador
a	0.12519 ±0.0036	0.15399 ±0.00252	0.11953 ±0.00369	0.10329 ±0.00337
x _c	2.11241 ±0.20265	2.02275 ±0.11622	3.35994 ±0.19365	2.6434 ±0.2182
k	0.62025 ±0.10768	0.63417 ±0.0644	0.47361 ±0.06401	0.62756 ±0.11649
R ²	0.9816	0.95001	0.97599	0.95316
R ² ajustado	0.97826	0.94092	0.97163	0.94465

B. Reducción de plomo del agua de Río

Para poder saber si las diferentes cepas de *Arthrospira* fueron capaces de reducir los niveles de plomo en las aguas del Río Moche se comparan con los Estándares de Control Ambiental del Perú (ECA), los diferentes parámetros se aprecian en la tabla II:

TABLA II
COMPARATIVO ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE PLOMO Y ECA

MUESTRA		ECA (ppm)		
Metal	Concentración (ppm)	Agua para consumo humano	Agua para consumo Animal	Agua para riego de cultivo
Plomo	0.2427	0.05	0.05	0.05

Tal como se observa la concentración de plomo es superior a los Estándares de Calidad Ambiental para el agua de consumo humano, agua para riego de vegetales y agua para consumo animal.

Se debe considerar que la cantidad de metales pesados en el agua afecta el crecimiento de esta cianobacteria, por lo que una baja concentración de metales pesados en el medio hace que el crecimiento poblacional aumente. Con base en su investigación se encontró que la tasa de crecimiento de *A. platensis* estaba influenciada por la concentración de Pb²⁺, a baja concentración de Pb podría estimular el crecimiento, también indicó que la *A. platensis* tolera una alta concentración de Pb²⁺, por lo que es capaz de remediar las aguas contaminadas [12].

El creciente interés en las soluciones biotecnológicas ambientales emergentes que utilizan sistemas de algas se debe a su resiliencia para adaptarse al entorno que cambia rápidamente, en particular la contaminación por metales pesados causada por actividades antropogénicas.

En la Figura 3 se realiza una comparación múltiple usando la prueba de Tukey donde se evidencia que los 4 tratamientos son estadísticamente distintivos. Debido a que buscamos cual es tratamiento que puede lograr mayor remoción de plomo observamos que el tratamiento que logra este objetivo fue de la *Arthrospira platensis* sin aireación teniendo una reducción de plomo del 85.37%, siguiéndole el tratamiento de la misma cepa con compresor de aire teniendo una reducción del 72.97%; en tercer lugar, está la cepa *Arthrospira máxima* con compresor de aire siendo capaz de reducir el 63.08% de plomo; por último esa misma cepa sin aerador siendo sus resultados pocos satisfactorios solo teniendo una reducción del 7.25%.

Además se ha informado que *Arthrospira platensis* posee una gran capacidad de absorción de metales pesados y es capaz de activar un conjunto definido de procesos bioquímicos y fisiológicos para contrarrestar la acción tóxica de los contaminantes ambientales [13].

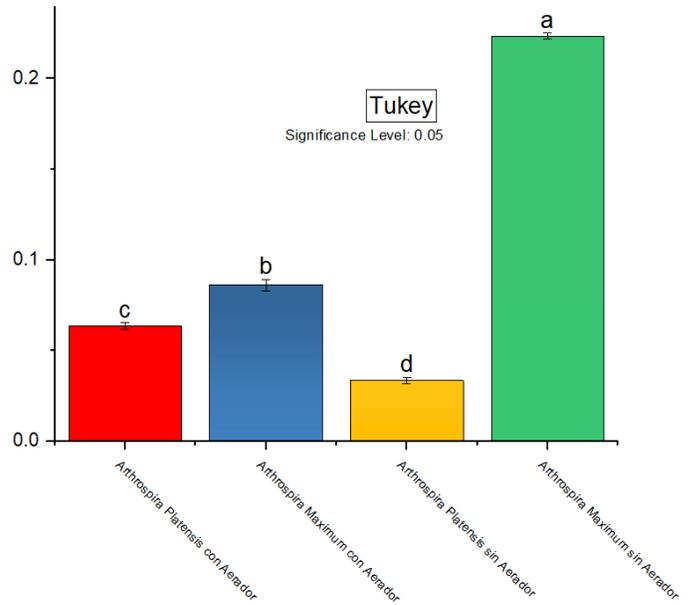


Fig. 3 Comparación de tratamientos realizados

La biomasa de las 2 cepas de algas en teoría es capaz tanto de adsorción como de absorción. En el proceso de adsorción, la tolerancia a los metales de las algas es una característica esencial. Cualquier cambio significativo en la cantidad de células de algas vivas que crecen en una solución de iones metálicos indica la tolerancia y adoptabilidad de las algas, esto en comparación al uso de materiales inertes para el mismo fin que solo usa la adsorción como fenómeno para extraer los metales del agua contaminada.

C. Efecto del tipo de cepa y aireación

La figura 4 muestra los efectos estandarizados de las 2 variables estudiadas donde tanto el tipo de cepa y la aireación son estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en el crecimiento de las variedades de *Arthrospira*.

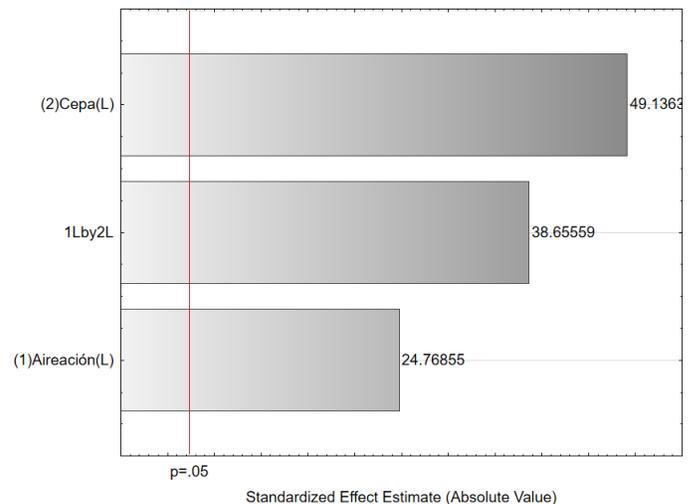


Fig. 4 Pareto estandarizado para efectos de tipo de cepa y aireación

IV. CONCLUSIONES

De la misma forma se evaluó el efecto combinado de las variables estudiadas, esto se muestra en la figura 5 donde lo representado en color rojo es el área de isorespuesta con mayores valores la cual está ligada a la variedad *Platensis* en condiciones de no aireación.

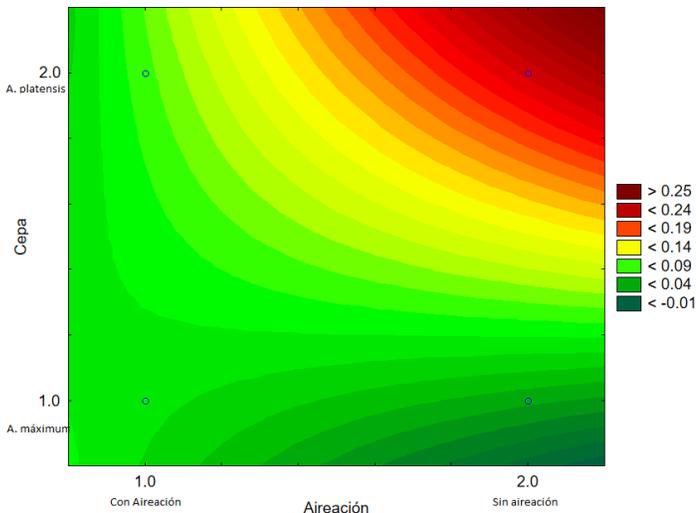


Fig. 5 Superficie de respuesta para efectos de tipo de cepa y aireación

Los resultados obtenidos concuerdan con hallazgos en investigaciones donde la *Arthrospira platensis* tuvo valores un poco más bajos de remoción de plomo estando de forma libre sin ningún tipo de factor externo que influya en su crecimiento [14]. Modificaciones en la tecnología podrían mejorar la eficiencia de remoción de plomo, como lo plantea Al-Homaidan [15] donde usaron la biomasa de la *Arthrospira platensis* para determinar si se puede remediar plomo, obteniendo un gran porcentaje de remoción >91%.

Los resultados de la investigación muestran que la aplicación de *Arthrospira* en ambas variedades logran el objetivo de poder reducir el contenido de plomo en las aguas analizadas, asimismo este potencial de uso es mayor en la variedad *platensis*, quizás por las condiciones de salinidad necesarias para la otra variedad, lo cual deja aun retos para poder seguir investigando en la optimización de cada variedad en base a los nutrientes necesarios y condiciones ambientales específicas para que podamos llegar a una aplicación final que pueda ser solución para la contaminación de este río tan importante en Perú. A su vez, es necesario investigar mucho más las interacciones de las microalgas con los metales pesados presentes en el agua ya que podría desencadenar reacciones no deseadas o impredecibles, lo que podría tener consecuencias negativas en el ecosistema acuático.

Las cianobacterias estudiadas mostraron resultados adecuados en la biorremediación de plomo, sobre todo la variante de *Arthrospira platensis* sin compresor de oxígeno logrando una reducción de 85.37% de plomo en agua. La variante de *Arthrospira máxima* presento los menores valores de remoción de plomo. Finalmente confirmamos nuestra hipótesis inicial que fue la viabilidad tecnológica del uso de cianobacterias para reducir de manera eficiente los niveles de plomo del Río Moche. Por lo tanto, el potencial de biorremediación de las microalgas en el agua de los ríos contaminados ayuda a reducir la carga de contaminantes en los ríos de agua dulce. Adicionalmente se genera la necesidad de más investigaciones para confirmar estos rendimientos a mayor escala y validar las condiciones operativas, como el tipo de estrategias de cultivo, iluminación y otras variables de importancia.

REFERENCIAS

- [1] F. Almomani y R. R. Bhosale, «Bio-sorption of toxic metals from industrial wastewater by algae strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of isotherm, kinetic models and process optimization», *Science of The Total Environment*, vol. 755, p. 142654, feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142654.
- [2] J. Oblitas, J. Morales, F. Rimarachin, W. Castro, y T. Chuquizuta, «Selection of key factors in the performance of *Kluyveromyces fragilis* biomass from serum of cheese by using a Plackett-Burman design [Selección de factores clave en el rendimiento de biomasa de *Kluyveromyces fragilis* a partir de suero de queso usando un diseño Plackett-Burman]», en *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2020. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.219.
- [3] Y. Cieza-Rimarachin, J. Cruz-Oblitas, E. Torres-Carranza, y J. Oblitas-Cruz, «Anaerobic Co-digestion with different concentrations of whey and cow dung in biogas production», presentado en *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2023.
- [4] J. Yan, A. Karlsson, Z. Zou, D. Dai, y U. Edlund, «Contamination of heavy metals and metalloids in biomass and waste fuels: Comparative characterisation and trend estimation», *Science of the Total Environment*, vol. 700, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134382.
- [5] L. Fang *et al.*, «Binding characteristics of copper and cadmium by cyanobacterium *Spirulina platensis*», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 190, n.º 1, pp. 810-815, jun. 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.03.122.
- [6] N. Kumar, S. Hans, R. Verma, y A. Srivastava, «Acclimatization of microalgae *Arthrospira platensis* for treatment of heavy metals in Yamuna River», *Water Science and Engineering*, vol. 13, n.º 3, pp. 214-222, sep. 2020, doi: 10.1016/j.wse.2020.09.005.
- [7] M. Villen-Guzman, C. Jiménez, y J. M. Rodríguez-Maroto, «Batch and Fixed-Bed Biosorption of Pb (II) Using Free and Alginate-Immobilized *Spirulina*», *Processes*, vol. 9, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2021, doi: 10.3390/pr9030466.
- [8] T. Zhou *et al.*, «Ecotoxicological response of *Spirulina platensis* to coexisted copper and zinc in anaerobic digestion effluent», *Science of The Total Environment*, vol. 837, p. 155874, sep. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155874.
- [9] R. De Philippis, G. Colica, y E. Micheletti, «Exopolysaccharide-producing cyanobacteria in heavy metal removal from water: Molecular basis and practical applicability of the biosorption process», *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 92, n.º 4, pp. 697-708, 2011, doi: 10.1007/s00253-011-3601-z.

- [10] W. G. M. Lakmali, A. D. S. N. P. Athukorala, y K. B. Jayasundera, «Investigation of Pb(II) bioremediation potential of algae and cyanobacteria strains isolated from polluted water», *Water Science and Engineering*, vol. 15, n.º 3, pp. 237-246, sep. 2022, doi: 10.1016/j.wse.2022.04.003.
- [11] A. N. del A. A. A. del A. H.-C. A. L. de A. M.-V.- Chao, «Actualización de identificación de fuentes contaminantes en la cuenca del río Moche», *Autoridad Nacional del Agua*, sep. 2015, Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4425>
- [12] K. K. I. U. Arunakumara, X. Zhang, y X. Song, «Bioaccumulation of Pb²⁺ and its effects on growth, morphology and pigment contents of *Spirulina (Arthrospira) platensis*», *J. Ocean Univ. China*, vol. 7, n.º 4, pp. 397-403, nov. 2008, doi: 10.1007/s11802-008-0397-2.
- [13] A. H. Sayed, D. Kitamura, S. Oda, S. Kashiwada, y H. Mitani, «Cytotoxic and genotoxic effects of arsenic on erythrocytes of *Oryzias latipes*: Bioremediation using *Spirulina platensis*», *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. 55, pp. 82-88, sep. 2019, doi: 10.1016/j.jtemb.2019.06.007.
- [14] C. Ramos Lucia, C. Ruiz Julio, L. Mendoza Luis, C. Ramos Lucia, C. Ruiz Julio, y L. Mendoza Luis, «Evaluación del potencial de biorremoción de plomo en fotobiorreactor por *Spirulina platensis* y *Pseudomonas aeruginosa*», *Arnaldoa*, vol. 29, n.º 2, pp. 267-276, may 2022, doi: 10.22497/arnaldoa.292.29105.
- [15] A. A. Al-Homaidan, H. J. Al-Houri, A. A. Al-Hazzani, G. Elgaaly, y N. M. S. Moubayed, «Biosorption of copper ions from aqueous solutions by *Spirulina platensis* biomass», *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 7, n.º 1, pp. 57-62, ene. 2014, doi: 10.1016/j.arabjc.2013.05.022.