

© 2026 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 29: 1-8, 2026.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2026.809>

## Respuesta de *Chlorella vulgaris* a la exposición de plomo y cromo hexavalente: efectos en el crecimiento y la remoción de metales

Marisela Y. Soto-Padilla<sup>1\*</sup>, Diana L. Valencia-García<sup>1</sup>, Sergio Alvarado-Soto<sup>1</sup>,  
Alejandro S. Cruz-Soto<sup>2</sup> y Claudia C. Hernández-Peña<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería y Tecnología e <sup>3</sup>Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro #450 Norte, Col. Partido Romero, 32584, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. <sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero #818 Sur, Col. Centro, 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México. E-mail: \*marisela.soto@uacj.mx

### RESUMEN

La contaminación por metales pesados representa una amenaza ambiental significativa en cuerpos de agua, especialmente en las regiones con alta actividad minera y agrícola como es en el estado de Chihuahua, México. En este estudio se evaluó la capacidad de una cepa nativa de *Chlorella vulgaris* para tolerar y remover el plomo (Pb) y el cromo hexavalente [Cr(VI)] en condiciones de laboratorio. La microalga fue cultivada en medio Miracle-Gro y condiciones controladas de fotoperiodo, temperatura y aireación. Se determinaron la concentración mínima inhibitoria (CMI), la cinética de crecimiento y la eficiencia de remoción de los metales a concentraciones de 5 y 50 mg/L. Los resultados mostraron que *C. vulgaris* tolera concentraciones bajas de Pb y logra remover más del 90% en las primeras 48 horas. En contraste, el Cr(VI) mostró una toxicidad significativa, al reducir drásticamente a la biomasa incluso a 5 mg/L. Las observaciones microscópicas evidenciaron daño celular asociado a la exposición al Cr(VI). Se concluye que *C. vulgaris* presenta un alto potencial para la biorremediación de aguas contaminadas con plomo, aunque se identifican limitaciones críticas para el cromo hexavalente. El presente estudio respalda el desarrollo de tecnologías sustentables con base en la utilización de microalgas para el tratamiento de aguas residuales en regiones del norte de México.

**Palabras clave:** biorremediación, microalgas, *Chlorella vulgaris*, plomo, cromo.

### Response of *Chlorella vulgaris* to Lead and Hexavalent Chromium Exposure: Effects on Growth and Metal Removal

### ABSTRACT

Heavy metal pollution represents a significant environmental threat in water bodies, particularly in regions with intense mining and agricultural activities such as Chihuahua, Mexico. This study evaluated the ability of a native strain of *Chlorella vulgaris* to tolerate and remove lead (Pb) and hexavalent chromium [Cr(VI)] under laboratory conditions. The microalga was cultivated in Miracle-Gro medium under controlled photoperiod, temperature, and aeration. The minimum inhibitory concentration (MIC), growth kinetics, and metal removal efficiency were assessed at 5 and 50 mg/L. Results showed that *Chlorella vulgaris* tolerates low concentrations of Pb and removes over 90% within the first 48 hours. In contrast, Cr(VI) exhibited significant toxicity, drastically reducing biomass even at 5 mg/L. Microscopic observations revealed cellular damage associated with Cr(VI) exposure. It is concluded that *Chlorella vulgaris* has high potential for bioremediation of lead-contaminated water, although critical limitations are identified for hexavalent chromium. This study supports the development of sustainable, microalgae-based technologies for wastewater treatment in northern Mexico.

**Keywords:** bioremediation, Microalgae, *Chlorella vulgaris*, Lead, Chrome.

## INTRODUCCIÓN

**L**a presencia de metales pesados en los cuerpos de agua se ha convertido en uno de los problemas ambientales más dañinos por su alta toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación (Rodríguez Heredia, 2017). Las descargas industriales y agrícolas son las principales fuentes de contaminación metálica, al liberar sustancias peligrosas como el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el arsénico (As) en los ecosistemas acuáticos (Reyes, Vergara, Torres, Lagos & Jimenez, 2016; Singh *et al.*, 2023). Estos contaminantes representan un riesgo para la vida acuática, la calidad del suelo y la salud pública, en particular en regiones en desarrollo donde la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales es insuficiente (Garbisu, Amézaga & Alkorta, 2002; Zhang *et al.*, 2023).

Los tratamientos fisicoquímicos convencionales (precipitación química, intercambio iónico y ósmosis inversa), son costosos, requieren alta demanda energética y generan contaminantes secundarios (Zhang *et al.*, 2023). Por ello, los procedimientos biológicos como la biorremediación han cobrado relevancia por ser ecológica, rentable y sostenible. Entre los agentes biológicos, las microalgas son un notable potencial para la eliminación de metales pesados a través de la biosorción, bioacumulación e intercambio iónico (Mustafa, Bhatti, Maqbool & Iqbal, 2021; Mahlangu, Mphahlele, De Paola & Mthombeni, 2024). Un ejemplo de las microalgas es *Chlorella vulgaris* que absorbe y retiene metales tóxicos en sus paredes celulares, por contener polisacáridos, proteínas, lípidos y grupos funcionales con capacidad de unirse a los iones metálicos (Fitri, Putra & Febria, 2024; Leong & Chang, 2020). Estos microorganismos también producen antioxidantes y quelantes que ayudan a mitigar el estrés oxidativo inducido por la exposición a metales (Chugh, Kumar, Shah & Bharadvaja, 2022). Además, su rápido crecimiento, naturaleza autótrofa y adaptabilidad a diversas condiciones ambientales las convierten en candidatas ideales y útiles para el tratamiento de agua contaminada (Jácome-Pilco, Ballesteros, Rea & Cayambe, 2021).

El estado de Chihuahua, ubicado en el norte de México, enfrenta una creciente contaminación en sus cuerpos de agua debido a las actividades minera, agrícola y de escorrentía urbana. Identificar cepas locales de microalgas capaces de mitigar esta contaminación sería la solución biotecnológica que se busca para adaptarla a las condiciones regionales. Este estudio aporta evidencia experimental comparativa al evaluar la capacidad de una cepa nativa de *C. vulgaris* para tolerar y remover Cr(VI) y Pb, en un entorno de laboratorio controlado. Esta investigación contribuye al desarrollo de las tecnologías que se aplican en el tratamiento de agua, pero con base en los recursos biológicos que se tienen en el norte de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Cultivo y activación de microalgas

*C. vulgaris* fue reactivada a partir de un aislamiento local reportado por Cervantes (2019). El cultivo se llevó a cabo en medio Miracle-Gro® (Papu & Lingfa), bajo fotoperíodo de 12h luz/12h oscuridad, a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  y una aireación constante durante 15 días. Se utilizó un sistema cerrado con aire estéril a través de una columna de agua secundaria para facilitar la disolución del  $\text{CO}_2$  y disminuir la contaminación (Chanquia, Vernet & Kara, 2022).

### Concentración mínima inhibitoria (CMI)

Se evaluaron distintas concentraciones de Cr(VI) y Pb (50 a 500 mg/L) por duplicado. Se utilizó dicromato de potasio y nitrato de plomo como fuentes metálicas (Hedayatkah, Cretoi, Emtiazi, Stal & Bolhuis, 2018; Rezaei, Pourang & Moradi, 2022). Se realizaron mediciones de la densidad óptica a 625 nm en los días 0 y 15.

### Crecimiento y remoción de metales

Se evaluaron las concentraciones 5 y 50 mg/L de Cr(VI) y Pb. Los tratamientos incluyeron: control, Cr(VI) 5 mg/L, Pb 5 mg/L, Cr(VI) 50 mg/L y Pb 50 mg/L. Cada tratamiento fue duplicado. Las muestras se tomaron a diario durante 15 días y se midió OD 625 nm, convirtiendo a biomasa seca (Spennati, Casazza, Perego, Solisio, Busca & Converti, 2019).

### Cuantificación de metales

El Cr(VI) se determinó por espectrofotometría UV-Vis mediante el método de la difenilcarbazida (Hernández-Peña *et al.*, 2021), y el Pb por espectrometría de absorción atómica, conforme a la norma NMX-AA-051-SCFI-2016 (Gallegos, Vega & Noriega, 2012).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La activación de la microalga en el medio Miracle-Gro® con oxigenación constante y bajo condiciones controladas de temperatura y fotoperíodo demostró ser efectiva para alcanzar una fase exponencial de crecimiento en un periodo de 15 días. Estas condiciones replican de manera óptima un entorno favorable en el crecimiento de las microalgas, lo cual es esencial en la obtención de una biomasa suficiente que se utilizará en análisis posteriores. La constante oxigenación y la adecuación del fotoperíodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad imitaron las condiciones naturales, lo que aumentó la productividad del cultivo. Sánchez-Bayo, Morales, Rodríguez, Vicente & Bautista (2020) destacan que el ciclo de luz/oscuridad 12:12 no solo se aproxima a las condiciones naturales, sino que también influye en una óptima producción de la biomasa en diversas especies de microalgas. El uso de

sistemas cerrados de cultivo en microalgas permite controlar los parámetros ambientales críticos y favorece los procesos sostenibles y productivos (Razzak et al., 2024).

La Figura 1 muestra la biomasa de *C. vulgaris* en relación con distintas concentraciones de Pb, y cómo la presencia de este metal afecta negativamente el crecimiento, pero en su ausencia, la biomasa es mayor, cercana a los 1,600 mg/L, lo que representa su mejor desarrollo, sin una influencia tóxica. Sin embargo, a medida que la concentración de Pb aumenta, se observa una disminución en la biomasa, lo cual sugiere un efecto inhibitorio. La reducción de biomasa es evidente incluso a concentraciones bajas de plomo. A partir de concentraciones de 50 mg/L y superiores, el efecto inhibitorio del Pb es pronunciado, con una reducción progresiva en la biomasa. Esto indica que *C. vulgaris* tiene una tolerancia limitada a su presencia y que la toxicidad de este metal afecta gravemente su crecimiento. Teoh & Wong (2018), muestran que incluso a niveles tan bajos como 10 mg/L, hay una reducción marcada en su tasa de crecimiento, en los contenidos de clorofila-a, de carotenoides y de proteína, aunque aún tiene la capacidad para tolerar estas concentraciones. Es interesante notar que a concentraciones de 200 y 500 mg/L, la biomasa parece estabilizarse, lo que sugiere el desarrollo de mecanismos de resistencia o que el efecto inhibitorio se mantiene a partir de ciertos niveles de exposición. Algunas microalgas, como *C. vulgaris*, tienen la capacidad de tolerar estos metales mediante un proceso llamado biosorción. Según los resultados obtenidos por Bajguz (2011), la biosorción de metales pesados (Cd, Pb y Cu) por la microalga no solo facilita la remoción de estos contaminantes del medio, sino que también induce una variedad de cambios bioquímicos en la microalga, como la producción de proteínas de choque térmico, la activación de enzimas antioxidantes y la acumulación de metabolitos específicos. Estos cambios influyen directamente en su capacidad de tolerancia, con la posibilidad de que se deba a una adaptación evolutiva al entorno contaminado.

En el crecimiento de *C. vulgaris* la presencia de Cr(VI) a diversas concentraciones (Figura 2), evidencia un fuerte efecto tóxico del metal incluso a bajas concentraciones. En ausencia de este, la biomasa alcanza un nivel máximo de aproximadamente 1,800 mg/L, lo que representa el mayor crecimiento de la microalga en ausencia de Cr(VI). Sin embargo, a una concentración de 50 mg/L de Cr(VI), hay una drástica disminución de la biomasa, a menos de 200 mg/L de biomasa, o sea, una inhibición severa del crecimiento. A concentraciones de 100 mg/L y superiores, la biomasa de *C. vulgaris* se mantiene a niveles extremadamente bajos, casi constantes, con posibilidad de que la causa es el grado de concentración y un efecto letal para el crecimiento de la microalga. Esto indica que *C. vulgaris* no solo tiene una baja tolerancia al Cr(VI), sino que el metal pesado actúa rápidamente como inhibidor del crecimiento incluso a niveles relativamente bajos. Lu, Gao, Li & Yang (2021), también mencionan que el crecimiento de *C. vulgaris* cae drásticamente ante la presencia del Cr (VI), incluso en concentraciones bajas como 2–5 mg/L, lo que coincide con una fuerte toxicidad y aumento del daño oxidativo en las células microalgales. Esta alta sensibilidad al Cr (VI) es por la capacidad del metal para inducir a estrés oxidativo a las células, alterando funciones metabólicas esenciales y provocando la muerte celular, aunque la microalga activa mecanismos antioxidantes como el incremento en la actividad del superóxido dismutasa (SOD) y catalasa, el estrés oxidativo persiste e inhibe significativamente a la biomasa (Lu et al., 2021). En comparación con otros metales, el efecto inhibitorio del Cr(VI) en *C. vulgaris* es en particular pronunciado, lo que señala la toxicidad de este contaminante (Bajguz, 2011). Estos resultados delimitan el alcance real de la microalga *C. vulgaris* y resaltan la importancia de monitorear y controlar la presencia del Cr(VI) en ambientes acuáticos, especialmente en ecosistemas donde las microalgas se utilizan como herramientas de biorremediación o para otras aplicaciones biotecnológicas. La baja tolerancia de *C. vulgaris* a este metal sugiere que su supervivencia puede ser limitada en ambientes

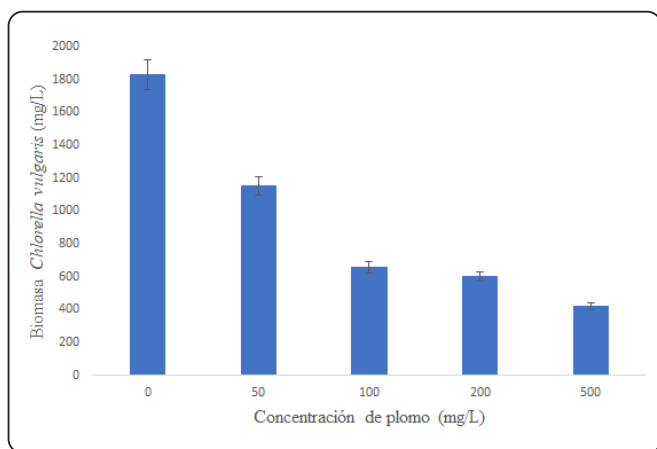


Figura 1. Concentración mínima inhibitoria de *Chlorella vulgaris* a la presencia de Pb.

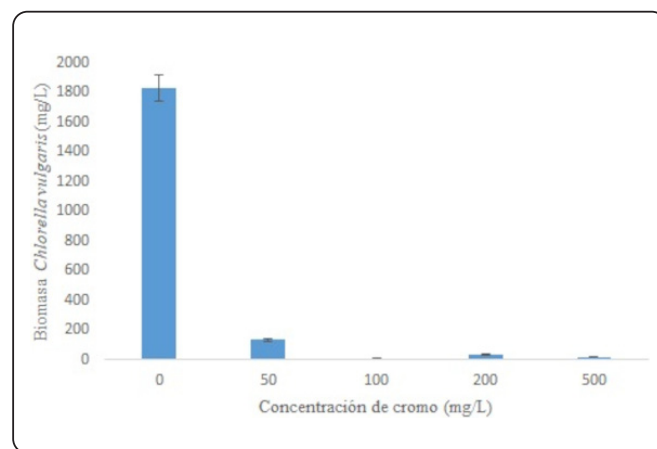


Figura 2. Concentración mínima inhibitoria de *Chlorella vulgaris* a la presencia de Cr(VI).

contaminados con Cr(VI), y reduce su efectividad como agente de remediación en esos ambientes. Estos resultados son consistentes con la literatura disponible, en especial con el estudio de Lee, Hsu & Yen (2017), al informar que el Cr(VI) es notoriamente tóxico para *Chlorella* y otras especies de microalgas. En su investigación, observaron que *C. vulgaris* tolera hasta 20 mg/L de Cr(VI) antes de que se inhiba el crecimiento. Esto es menos que los 50 mg/L de Cr(VI) utilizados en nuestro estudio. Travieso *et al.* (1999) demostraron de igual manera que *C. vulgaris* tolera hasta 45 mg/L de Cr(VI) antes de que se inhiba el crecimiento, lo cual es ligeramente inferior a los 50 mg/L observados en nuestro estudio. La discrepancia de 5 mg/L entre ambos experimentos es por diferencias en las condiciones experimentales, como variaciones en el valor del pH del medio, la temperatura, o en la cepa de *C. vulgaris* utilizada. Además, factores como el tiempo de exposición y la presencia de ciertos nutrientes también influirían en la tolerancia al Cr(VI). Al comparar estos resultados con otras especies, como *Scenedesmus acutus*, se sabe que la tolerancia es menor, con una concentración máxima tolerable de solo 15 mg/L de Cr(VI). Esto resalta una variabilidad inter-específica en la respuesta al Cr(VI), por lo que se sugiere que *C. vulgaris* posee mecanismos de resistencia relativamente más robustos que otras

microalgas. Esta diferencia en la tolerancia estaría asociada a adaptaciones específicas relacionadas con la activación de sistemas antioxidantes o a la capacidad de reducir el Cr(VI) a Cr(III), una forma menos tóxica, característica de sus células (Travieso *et al.*, 1999).

Los resultados observados en las imágenes microscópicas (Figura 3), evidencian una clara relación entre la concentración de los metales pesados y el efecto citotóxico sobre los cultivos celulares. En las muestras de los tratamientos con Pb se aprecia una alta densidad celular con morfología uniforme y células bien definidas, lo que hace pensar en una tolerancia moderada al metal en concentraciones bajas. A 50 mg/L de Pb, se presenta una disminución significativa en la densidad y un aumento en la heterogeneidad del tamaño celular, acompañada de signos de daño estructural. En cambio, los tratamientos con 5 mg/L de Cr(VI) muestran un efecto severo, que incluso a 5 mg/L, la densidad celular es baja y con células parcialmente deformadas. Sin embargo, al incrementar la concentración a 50 mg/L de Cr(VI), el impacto es drástico, con muy baja densidad celular, morfología alterada y presencia de material extracelular amorfo, lo que indica una posible lisis celular generalizada. Estos resultados indican que el Cr(VI) ejerce un efecto tóxico más

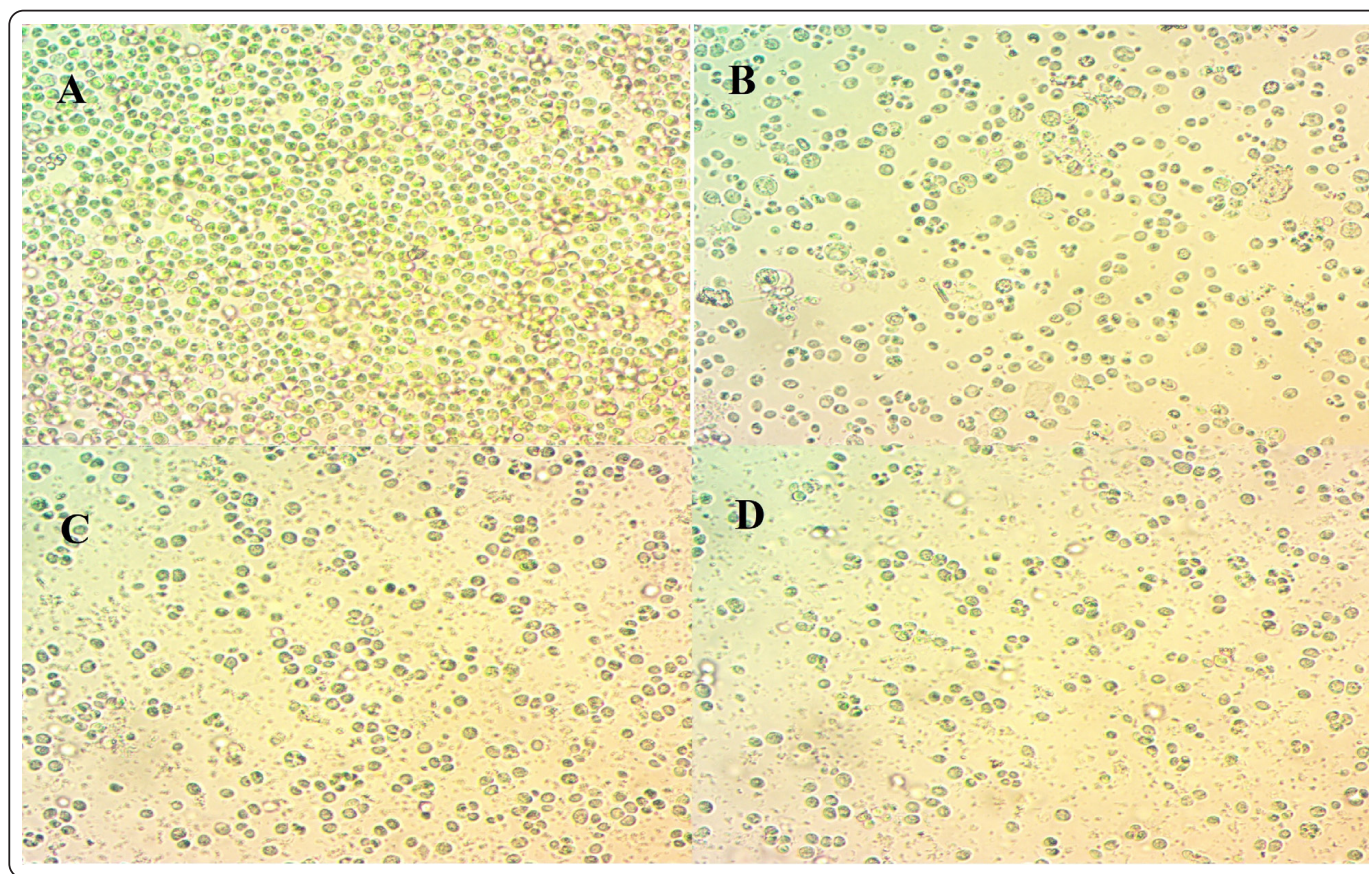


Figura 3. Imágenes microscópicas de *Chlorella vulgaris* al día 5 de incubación a: A) Pb-5 mg/L, B) Pb-50 mg/L, C) Cr(VI)-5 mg/L y D) Cr(VI)-50 mg/L.

agresivo que el Pb, al comprometer la viabilidad y la estructura celular incluso a concentraciones relativamente bajas.

Las Figuras 4 y 5 muestran el crecimiento de *C. vulgaris* en función del tiempo y en la presencia de dos metales pesados, Pb y Cr(VI), a diferentes concentraciones (5 mg/L y 50 mg/L), comparado con un control sin metales (0 mg/L). Los resultados reflejan el impacto de estos contaminantes en la biomasa de la microalga y su capacidad de adaptación a diferentes niveles de toxicidad. La Figura 4, representa el crecimiento de *C. vulgaris* en presencia del Pb, y la biomasa del control (0 mg/L) tiene un crecimiento máximo de 1,500 mg/L al octavo día, para después estabilizarse. A una concentración de 5 mg/L de Pb, la microalga también muestra un crecimiento significativo, aunque levemente inferior al control, con un máximo de 1,200 mg/L, y capacidad de tolerancia al plomo a concentraciones bajas. Sin embargo, a 50 mg/L, el crecimiento de la microalga se ve gravemente afectado y la

biomasa permanece baja a lo largo de todo el experimento, sin superar los 400 mg/L. Esto indica que una concentración de 50 mg/L de Pb inhibe significativamente el crecimiento de la microalga, debido al daño en el proceso fotosintético y al estrés oxidativo inducido por el metal. La Figura 5 muestra el desarrollo de *C. vulgaris* en presencia de Cr(VI). En este caso, el crecimiento de la microalga en el control (0 mg/L) sigue una tendencia similar a la observada con el Pb, al alcanzar un máximo alrededor del octavo día y estabilidad próxima a los 1,500 mg/L. A una concentración de 5 mg/L de Cr(VI), el crecimiento de la microalga es reducida durante los primeros días, con un máximo de casi 1,300 mg/L en el día 15, indicativo de una alta sensibilidad al Cr(VI) incluso a bajas concentraciones. A 50 mg/L, el efecto inhibitorio es aún más pronunciado, y la biomasa no aumenta con el tiempo, y se mantiene cercana a cero. Esto sugiere que el Cr(VI) es más tóxico para *C. vulgaris* que el Pb en concentraciones similares, quizá sea por su efecto oxidativo directo sobre estructuras celulares y enzimáticas (Balali-Mood, Naseri, Tahergerabi, Khazdair & Sadeghi, 2021). Esto coincide con estudios previos que indican que *C. vulgaris* es capaz de tolerar bajas concentraciones de metales pesados, pero su crecimiento se ve afectado cuando las concentraciones aumentan (Bajguz, 2011; Lee et al., 2017; Zhang et al., 2013).

En esta investigación, los resultados en la Figura 6 indican que *C. vulgaris* muestra una alta eficiencia en la remoción de Pb, con una reducción de más del 90% en los dos primeros días tanto a 5 como a 50 mg/L, estable a lo largo del experimento, y coherente con estudios previos que han evaluado la capacidad de las microalgas para remover metales pesados. Por ejemplo, *S. acutus* mostró índices de remoción del 89% para Pb y el 97% para Hg (Inthorn, Sidtitoon, Silapanuntakul & Incharoensakdi, 2002). Estos altos índices se deben, en parte, a las características de la pared celular de las microalgas, cuya composición superficial facilita la adsorción de metales.

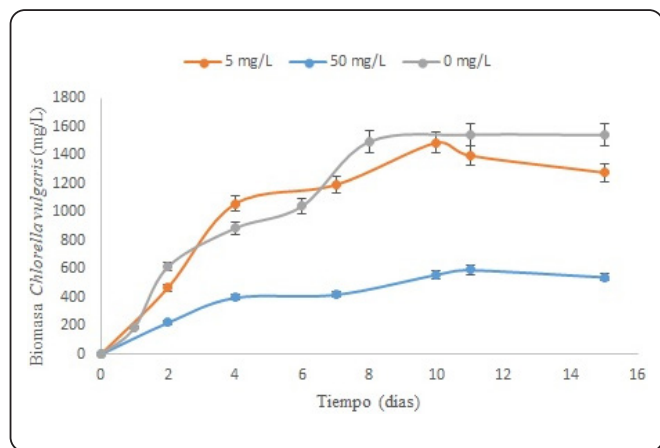


Figura 4. Cinética de crecimiento de *Chlorella vulgaris* a diferentes concentraciones de Pb.

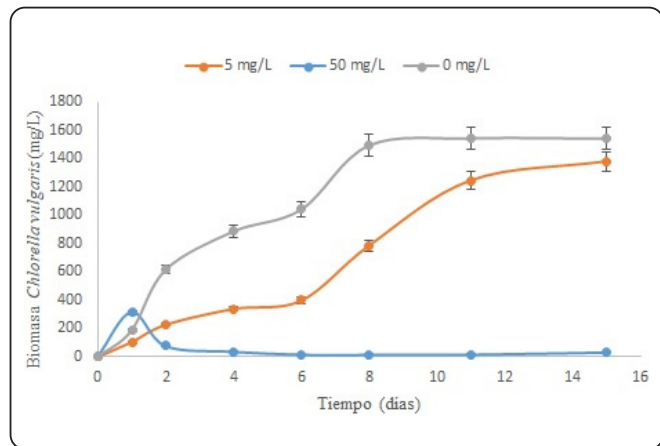


Figura 5. Cinética de crecimiento de *Chlorella vulgaris* a diferentes concentraciones de Cr(VI).

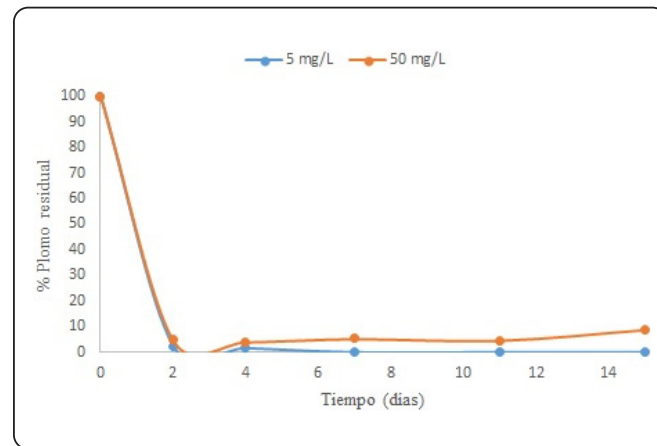


Figura 6. Cinética de remoción de Pb por *Chlorella vulgaris*.

Chakraborty, Talukdar, Dey & Bhattacharya (2025) destacan que la capacidad de absorción de metales depende, como se mencionó, de la composición de la pared celular, con carga negativa debido a la presencia de grupos funcionales (carboxilos y fosfatos), que interactúan con los cationes metálicos. En línea con esto, la remoción de Pb observada en nuestra investigación también puede estar influenciada por la composición de la pared celular de *C. vulgaris*, con una fuerte interacción entre los cationes de Pb y estos grupos funcionales. La remoción de metales por microalgas involucra dos etapas: primero, una adsorción pasiva, rápida y reversible sobre la superficie celular, seguida de un proceso activo más lento y de naturaleza irreversible, donde los cationes metálicos son transportados al interior de la célula a través de la membrana hacia el citoplasma. Esto explicaría la estabilidad después de los primeros días, Figura 6. Durante las primeras 24-48 horas, el proceso pasivo permite una eliminación rápida del Pb en solución, lo que se refleja en la disminución de la concentración del Pb residual. Posteriormente, el proceso activo más lento sería responsable de la remoción adicional y la estabilidad a niveles bajos, especialmente en la concentración de 50 mg/L. La remoción de metales pesados por *C. vulgaris* en esta investigación presenta características similares a las observadas en estudios anteriores, que demuestran su capacidad para acumular metales pesados en dosis- y tiempo-dependiente, igual a lo que sucede con el Cd, Pb y Cu (Bajguz, 2011). En concentraciones más altas de metales, como las utilizadas en esta investigación (50 mg/L de Pb), se observó una rápida adsorción pasiva inicial seguida de un proceso más lento y activo. Sin embargo, en esta investigación centrada en Pb, *C. vulgaris* mostró una considerable capacidad de remoción, en la que los mecanismos de detoxificación involucrados, como la quelación de iones metálicos por ligandos como ácidos orgánicos y las fitoquelatinas (PCs), tuvieron un papel importante en la homeostasis de los metales pesados (Balzano *et al.*, 2020; Kyrtzopoulou, Kyzaki, Malletzidou, Nerantzis & Kazakis, 2025).

Por otro lado, las observaciones de una rápida adsorción inicial son consistentes con el proceso de biosorción, y que independiente del metabolismo sucede en cuestión de minutos, como está documentado en la literatura. La biosorción, que depende del pH del medio y de la presencia de otros iones, parece ser el mecanismo dominante en esta investigación para la remoción de metales. En este estudio, la estabilización del Pb residual después de los primeros días se atribuye al inicio de un proceso de acumulación activa, que es más efectivo en concentraciones bajas de metales (por debajo de 1 ppm) y depende del metabolismo celular.

En contraste, la remoción de Cr(VI) fue más dependiente de la concentración, porque a 5 mg/L se logró una eliminación

casi completa en ocho días, y con 50 mg/L solo se removió el 50% al final del periodo (Figura 7). La menor eficiencia de remoción del Cr(VI) a concentraciones elevadas se relaciona con su alta toxicidad. El Cr(VI) actúa como agente oxidante fuerte que daña proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, y afecta negativamente el metabolismo celular de la microalga (Balali-Mood *et al.*, 2021). A concentraciones más bajas, esta es capaz de reducir Cr(VI) a Cr(III), una forma menos tóxica y más fácil de acumular intracelularmente, mediante los mecanismos enzimáticos de la actividad de reductasas dependientes de NADPH (Zhao *et al.*, 2023).

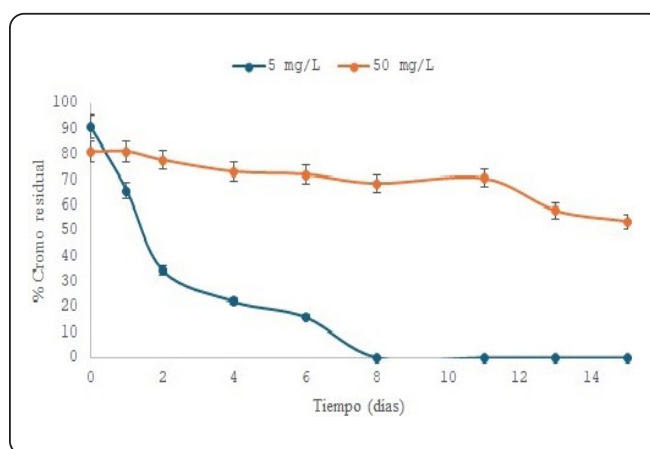


Figura 7. Cinética de remoción de Cr(VI) por *Chlorella vulgaris*.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones que destacan el potencial de *C. vulgaris* para la biorremediación de aguas residuales contaminadas con metales pesados. Por ejemplo, en Kusuma, Illiyanasafa, Jaya, Darmokoesoemo & Putra (2024) informan de una alta eficiencia de remoción de Hg por la microalga en condiciones similares a otros estudios. Asimismo, Kumar, Dahms, Won, Lee & Shin (2015) señalaron que la tolerancia diferencial de las microalgas ante metales pesados estaría determinada por los factores: de bioacumulación, de producción de compuestos antioxidantes y de excreción de metabolitos secundarios con propiedades quelantes.

### CONCLUSIONES

La presente investigación demostró la efectividad de *C. vulgaris*, recolectada en el estado de Chihuahua, para remover el Pb del agua contaminada experimentalmente, y por una alta eficiencia de biosorción durante las primeras 48 horas de tratamiento. En contraste, el Cr(VI) por ser más tóxico, limitó la producción de biomasa y la capacidad de remoción. Sin embargo, estos resultados respaldan el uso de las microalgas en una tecnología descentralizada para el tratamiento de aguas residuales en el norte de México.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos los siguientes apoyos: al Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez para la realización de este estudio y al SECIHTI (México) por otorgar la beca de posgrado.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## REFERENCIAS

- Bajguz, A. (2011). Suppression of *Chlorella vulgaris* growth by cadmium, lead, and copper stress and its restoration by endogenous brassinolide. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **60**(3), 406-416. [https://link.springer.com/article/10.1007/s00244-010-9551-0?utm\\_source=chatgpt.com](https://link.springer.com/article/10.1007/s00244-010-9551-0?utm_source=chatgpt.com)
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R. & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, **12**, 643972. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- Balzano, S., Sardo, A., Blasio, M., Chahine, T. B., Dell'Anno, F., Sansone, C. & Brunet, C. (2020). Microalgal metallothioneins and phytochelatins and their potential use in bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, **11**, 517. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00517>
- Cervantes, K. F. H. (2019). Aislamiento e identificación de microalgas y evaluación de parámetros en dinámica de crecimiento en fijación de CO<sub>2</sub>. Tesis de Maestría en Estudios y Gestión Ambiental. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. 70.
- Chanquia, S. N., Vernet, G. & Kara, S. (2022). Photobioreactors for cultivation and synthesis: Specifications, challenges, and perspectives. *Engineering in Life Sciences*, **22**(12), 712-724. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100070>
- Chakraborty, S., Talukdar, A., Dey, S. & Bhattacharya, S. (2025). Role of fungi, bacteria and microalgae in bioremediation of emerging pollutants with special reference to pesticides, heavy metals and pharmaceuticals. *Discover Environment*, **3**(1), 91. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00217-7>
- Chugh, M., Kumar, L., Shah, M. P. & Bharadvaja, N. (2022). Algal Bioremediation of heavy metals: An insight into removal mechanisms, recovery of by-products, challenges, and future opportunities. *Energy Nexus*, **7**, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100129>
- Fitri, W. E., Putra, A. & Febria, F. A. (2024). Removal of Heavy Metals Using *Chlorella vulgaris*: A Review. *Journal Katalisator*, **9**(1), 148-162. <http://doi.org/10.22216/jk.v5i2.5717>
- Gallegos, W., Vega, M. & Noriega, P. (2012). Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja*, **15**(1), 19-29. <https://doi.org/10.17163/lgr.n15.2012.02>
- Garbisu, C., Amézaga, I. & Alkorta, I. (2002). Biorremediación y ecología. *Ecosistemas*, **11**(3), 1-2. <http://www.aect.org/ecosistemas/023/opinion1.htm>
- Hedayatkah, A., Cretoiu, M. S., Emtiazi, G., Stal, L. J. & Bolhuis, H. (2018). Bioremediation of chromium contaminated water by diatoms with concomitant lipid accumulation for biofuel production. *Journal of Environmental Management*, **227**, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.011>
- Hernández-Peña, C. C., Lares-Villa, F., Santos-Villalobos, S. D. L., Estrada-Alvarado, M. I., Cruz-Soto, A., Flores-Tavizon, E. & Soto-Padilla, M. Y. (2021). Reduction in concentration of chromium (VI) by *Lysinibacillus macroides* isolated from sediments of the Chapala Lake, Mexico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **93**(2), e20190144. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190144>
- Inthorn, D., Sidtitoon, N., Silapanuntakul, S. & Incharoensakdi, A. (2002). Sorption of mercury, cadmium and lead by microalgae. *Sci. Asia*, **28**(3), 253-261. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2002.28.253>
- Jacome-Pilco, C., Ballesteros, C., Rea, E. & Cayambe, L. M. R. (2021). Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtUMBRES. *Ciencia y Tecnología*, **14**(2), 47-55. <https://doi.org/10.18779/cyt.v14i2.502>
- Kumar, K. S., Dahms, H. U., Won, E. J., Lee, J. S. & Shin, K. H. (2015). Microalgae a promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **113**, 329-352. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
- Kusuma, H. S., Illiyanasafa, N., Jaya, D. E. C., Darmokoesoemo, H. & Putra, N. R. (2024). Utilization of the microalga *Chlorella vulgaris* for mercury bioremediation from wastewater and biomass production. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, **37**, 101346. <https://doi.org/10.1016/j.sep.2023.101346>
- Kyrtzopoulou, E., Kyzaki, N., Malletzidou, L., Nerantzis, E. & Kazakis, N. A. (2025). The Efficiency of *Chlorella vulgaris* in Heavy Metal Removal: A Comparative Study of Mono- and Multi-Component Metal Systems. *Clean Technologies*, **7**(2), 35. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>
- Lee, L., Hsu, C. Y. & Yen, H. W. (2017). The effects of hydraulic retention time (HRT) on chromium (VI) reduction using autotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **40**(12), 1725-1731. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1827-6>
- Leong, Y. K. & Chang, J. S. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. *Bioresource technology*, **303**, 122886. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122886>
- Lu, M. M., Gao, F., Li, C. & Yang, H. L. (2021). Response of microalgae *Chlorella vulgaris* to Cr stress and continuous Cr removal in a membrane photobioreactor. *Chemosphere*, **262**, 128422. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128422>

- Mahlangu, D., Mphahlele, K., De Paola, F. & Mthombeni, N. H. (2024). Microalgae mediated biosorption for effective heavy metals removal from wastewater: A review. *Water*, **16(5)**, 718. <https://doi.org/10.3390/w16050718>
- Mustafa, S., Bhatti, H. N., Maqbool, M. & Iqbal, M. (2021). Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. *Journal of Water Process Engineering*, **41**, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102009>
- Papu, N. H. & Lingfa, P. (2018, April). Isolation, biomass estimation and characterization of the biofuel potential of diatom *Navicula Sphaerophora*. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1952, No. 1, p. 020060). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5032022>
- Razzak, S. A., Bahar, K., Islam, K. O., Haniffa, A. K., Faruque, M. O., Hossain, S. Z. & Hossain, M. M. (2024). Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering*, **5(4)**, 418-439. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D. & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, **16(2)**, 66-77. <https://core.ac.uk/download/pdf/386133717.pdf>
- Rezaei, M., Pourang, N. & Moradi, A. M. (2022). Removal of lead from aqueous solutions using three biosorbents of aquatic origin with the emphasis on the affective factors. *Scientific Reports*, **12(1)**, 751. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04744-0>
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan*, **21(12)**, 3372-3385. <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n12/san122112.pdf>
- Sánchez-Bayo, A., Morales, V., Rodríguez, R., Vicente, G. & Bautista, L. F. (2020). Cultivation of microalgae and cyanobacteria: Effect of operating conditions on growth and biomass composition. *Molecules*, **25(12)**, 2834. <https://doi.org/10.3390/molecules25122834>
- Singh, V., Singh, N., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A. K., Singh, M. P., Sahoo, A., Shekhar, S., Vamanu, E. & Mishra, V. (2023). Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Toxics*, **11(2)**, 147. <https://doi.org/10.3390/toxics11020147>
- Spennati, E., Casazza, A. A., Perego, P., Solisio, C., Busca, G. & Converti, A. (2019). Microalgae growth in winery wastewater under dark conditions. *Chemical Engineering Transactions*, **74**, 1471-1476. <https://doi.org/10.3303/CET1974246>
- Teoh, M. L. & Wong, S. W. (2018). Influence of lead on growth and physiological characteristics of a freshwater green alga *Chlorella* sp. *Malaysian Journal of Science*, **37(2)**, 82-93. <http://dx.doi.org/10.22452/mjs.vol37no2.1>
- Travieso, L., Canizares, R. O., Borja, R., Benitez, F., Dominguez, A. R., Dupeyrón y, R. & Valiente, V. (1999). Heavy metal removal by microalgae. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **62(2)**, 144-151.
- Zhang, W., Xiong, B., Chen, L., Lin, K., Cui, X., Bi, H., Guo, M. & Wang, W. (2013). Toxicity assessment of *Chlorella vulgaris* and *Chlorella protothecoides* following exposure to Pb (II). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **36(1)**, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2013.03.003>
- Zhang, P., Yang, M., Lan, J., Huang, Y., Zhang, J., Huang, S., Yang, Y. & Ru, J. (2023). Water quality degradation due to heavy metal contamination: Health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. *Toxics*, **11(10)**, 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828>
- Zhao, D., Cheah, W. Y., Lai, S. H., Ng, E. P., Khoo, K. S., Show, P. L. & Ling, T. C. (2023). Symbiosis of microalgae and bacteria consortium for heavy metal remediation in wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11(3)**, 109943. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109943>