revista estudios ambientales
publicación digital del CINEA

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

Aplicación de microorganismos en *Salvinia biloba* para reducir la fitotoxicidad por cromo

Application of microorganisms in *Salvinia biloba* to reduce chromium phytotoxicity

María de los Ángeles Martínez Saucedo [1,4]

Judith Elizabeth Lacava [2]

Pamela Romina Bernabeu [3,4 *]

[1] Universidad Argentina de la Empresa (UADE). Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas (FAIN). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
[2] Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (IIIA-UNSAM-CONICET), Escuela de Hábitat y Sostenibilidad, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Campus Miguelete, San Martín, Buenos Aires, Argentina.
[3] Universidad Argentina de la Empresa (UADE). Instituto de Tecnología (INTEC). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
[4] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires, Argentina.
E mail*: pbernabeu@uade.edu.ar

Martínez Saucedo, M. de los A.; Lacava, J.E.; Bernabeu, P.R. (2025). Aplicación de microorganismos en Salvinia biloba para reducir la fitotoxicidad por cromo. *Revista Estudios Ambientales,* 13(1), 52-65.

Recibido: *13/11/2024* - ***Aceptado:*** *23/06/2025* - ***Publicado:*** *18/07/2025*

RESUMEN

Los metales pesados son elementos con alta densidad y toxicidad, incluso en bajas concentraciones. Aunque algunos se encuentran naturalmente en el ambiente, la mayoría proviene de actividades antrópicas. Se consideran contaminantes prioritarios debido a su persistencia, bioacumulación y efectos adversos en organismos vivos.

La fitorremediación, que emplea biomasa vegetal para remover contaminantes del suelo, aire o agua, representa una estrategia ecológica y económica. Las plantas utilizadas deben ser preferentenemte autóctonas, de rápido crecimiento y capaces de tolerar y acumular metales. Sin embargo, concentraciones elevadas de metales pueden causar fitotoxicidad, limitando su aplicación. Para mitigar este efecto, se propuso el uso de

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB), que favorecen el desarrollo y la tolerancia al estrés en las plantas.

En este estudio se evaluó el efecto de *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas aeruginosa* sobre *Salvinia biloba*, una especie acuática con potencial fitorremediador, expuesta a distintas concentraciones de cromo hexavalente (Cr(VI)). Se analizaron parámetros morfológicos y fisiológicos de la planta, así como la tolerancia de las bacterias al contaminante.

Los resultados mostraron que concentraciones crecientes de Cr(VI) afectaron negativamente el peso fresco, largo de raíz y cantidad de hojas de *S. biloba*. Ambos microorganismos demostraron tolerancia al contaminante, y su inoculación promovió el crecimiento vegetal en condiciones controladas. En presencia de Cr(VI), se observó una mejora en todos los parámetros analizados tras la inoculación, especialmente *con P. aeruginosa*, que resultó más eficaz que *B. subtilis* en condiciones de estrés.

Estos hallazgos evidencian que la asociación de *S. biloba* con bacterias PGPB puede aumentar su tolerancia a metales pesados y mejorar su desempeño fitorremediador. Esta aplicación representa una estrategia biotecnológica promisoria para la remediación de ambientes acuáticos contaminados con cromo.

PALABRAS CLAVE: bacterias promotoras del crecimiento vegetal, cromo, fitotoxicidad, macrófitas acuáticas, metales pesados.

ABSTRACT

Heavy metals are high-density elements toxic even at low concentrations. While some occur naturally in the environment, most derive from anthropogenic sources. Due to their persistence, bioaccumulation, and harmful effects on biota, they are classified as priority pollutants. Phytoremediation—using plant biomass to remove pollutants from soil, air, or water—is an eco-friendly, cost-effective remediation strategy. Optimal phytoremediators are native, fast-growing species capable of metal tolerance and accumulation. However, high metal concentrations can induce phytotoxicity, limiting plant performance. To mitigate this effect, plant growth-promoting bacteria (PGPB) have been proposed, as they enhance plant development and stress tolerance. This study evaluated the effect of Bacillus subtilis and Pseudomonas aeruginosa on Salvinia biloba, an aquatic plant with phytoremediation potential, under exposure to varying concentrations of hexavalent chromium (Cr(VI)). Plant

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

morphological and physiological parameters, along with bacterial tolerance to Cr(VI), were assessed. The results showed that increasing concentrations of Cr(VI) exposure reduced fresh weight, root length, and leaf number in S. biloba. Both bacterial strains tolerated Cr(VI) and promoted plant growth under controlled conditions, with P. aeruginosa showing greater efficacy than B. subtilis. Inoculation improved all measured plant parameters under Cr(VI) exposure. These results suggest that PGPB can enhance S. biloba's tolerance to Cr(VI), improving its phytoremediation capacity. This plant-microbe association offers a promising biotechnological approach for remediating chromium-contaminated aquatic environments.

KEYWORDS: *plant growth-promoting bacteria, chromium, phytotoxicity, aquatic macrophytes, heavy metals.*

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son un grupo de metales y metaloides que tienen un alto peso molecular, una alta densidad y son tóxicos, algunos incluso en pequeñas concentraciones (Yadav et al., 2019). La mayor fuente de metales pesados proviene de actividades humanas, como por ejemplo la minería, actividades industriales, aguas residuales, etc. (Ali et al., 2020). Se les considera uno de los contaminantes ambientales más preocupantes ya que no pueden ser química o biológicamente degradados y tienden a acumularse en distintos organismos, provocando complicaciones biológicas y fisiológicas (Briffa et al., 2020; Rizzo et al., 2020). Particularmente, el Cr(VI) es un contaminante ambiental de alta toxicidad, ampliamente liberado a partir de actividades industriales como la galvanoplastía, la producción de pigmentos, el curtido de cuero y la industria metalúrgica. A diferencia del Cr(III), una forma menos tóxica y esencial en pequeñas cantidades, el Cr(VI) es altamente soluble, móvil en el ambiente y puede atravesar fácilmente las membranas biológicas, generando estrés oxidativo, daño celular y efectos mutagénicos. Su persistencia en cuerpos de agua y suelos representa un riesgo significativo para la biota acuática y terrestre, así como para la salud humana, lo que ha llevado a su clasificación como compuesto cancerígeno por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Existen diferentes métodos físicos y químicos para la eliminación de metales pesados, como filtración por membrana, intercambio iónico, adsorción, precipitación química (Pabón et al., 2020), pero estos métodos no siempre son efectivos, no son sustentables, y/o son costosos (Ali et al., 2020; Emiliani et al., 2020). Por esta razón, se empezaron a investigar métodos alternativos que sean más amigables con el ambiente y económicos para la remediación de sitios contaminados. La fitorremediación es la utilización de la biomasa vegetal para absorber y acumular contaminantes presentes en el suelo, aire y agua (Llatance Oyarce et al., 2019). Para que una planta pueda ser utilizada eficientemente debe ser nativa del lugar, tener crecimiento rápido y ser capaz de absorber y tolerar los contaminantes (Ali et

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

al., 2020). *Salvinia biloba* es una planta acuática de la familia *Salviniaceae*, nativa de la zona de los humedales del Delta del Río Paraná, que presenta una alta velocidad de crecimiento, puede sobrevivir a condiciones adversas y es capaz absorber metales pesados (Emiliani et al., 2021). Si bien *S. biloba* es una pteridófita acuática que no presenta hojas ni raíces verdaderas, por convención y con el fin de facilitar la lectura y la interpretación de los resultados, en el presente trabajo se utilizarán los términos "hojas" para referirse a las pinnas flotantes y "raíces" para designar a las estructuras sumergidas especializadas en la absorción.

Para aumentar la capacidad natural de fitorremediación de las plantas se ha propuesto la utilización de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB por sus siglas en inglés: *Plant Growth Promoting Bacteria*), que promueven el crecimiento vegetal a través de mecanismos directos e indirectos (Kong y Glick, 2017; Mesa-Marín et al., 2020; Olanrewaju et al., 2017). Generalmente, se observa un efecto beneficioso en el crecimiento por parte de las PGPB cuando las plantas crecen en condiciones de estrés, como por ejemplo alta salinidad o presencia de metales pesados (Kong y Glick, 2017).

En el presente trabajo, se utilizaron dos microorganismos previamente reportados como PGPB: *P. aeruginosa* y *B. subtilis* (Mahapatra et al., 2022; Radhapriya et al., 2015; Ramakrishna et al., 2019). Mediante su aplicación en *S. biloba* se busca determinar si la inoculación lleva a una mejora en la tolerancia de la planta a metales pesados, en pos de favorecer el proceso de fitorremediación.

METODOLOGÍA

Material biológico, mantenimiento y cultivo

Se utilizaron dos bacterias con características promotoras del crecimiento vegetal previamente reportadas: *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus subtilis*. Ambos microorganismos se mantuvieron en medio LB (Luria-Bertani) (Sambrook et al., 1989) con glicerol 20 % a -80 °C. Los cultivos bacterianos para los ensayos de inoculación de plantas se realizaron en medio LB líquido en agitación durante 24 horas a 30°C.

Las plantas de *Salvinia biloba* fueron obtenidas de la Reserva Ecológica Costanera Sur, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina (34°36′14″S 58°21′09″O). Previo a su uso, se lavaron con agua destilada y se aclimataron en solución nutritiva (0,588 mg/L $CaCl_2$, 0,246 mg/L $MgSO_4$, 0,126 mg/L $NaHCO_3$, 0,055 mg/L KCl) en cámara de cultivo a 25 ± 2 °C, con ciclos de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad y 12000 LUX (Mendes et al., 2021).

Ensayos de tolerancia de Salvinia biloba a distintas concentraciones de Cr(VI)

Para analizar la tolerancia de *S. biloba* a distintas concentraciones de Cr(VI), se utilizaron sistemas armados en recipientes rectangulares de vidrio de 10 cm de alto, 9 cm de lado y 9 cm de profundidad con 750 mL de volumen útil, en los que se agregaron 400 mL de solución nutritiva y se colocaron aproximadamente 7,7 ± 0,1 gramos de material vegetal. Se adicionó a cada sistema la cantidad necesaria de una solución stock de 1000 ppm de Cr(VI) realizada con $K_2Cr_2O_7$, para llegar a las distintas concentraciones evaluadas: 0 (control) 1, 3 y 5 ppm de Cr(VI). Los sistemas se colocaron en cámara de cultivo con temperatura y luz controladas (26°C y

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

fotoperíodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad) durante 15 días. Cada tratamiento se realizó por triplicado en dos ensayos independientes.

Análisis de tolerancia de Pseudomonas aeruginosa y Bacillus subtilis a distintas concentraciones de Cr(VI)

Para el estudio de la tolerancia de los microorganismos a distintas concentraciones de Cr(VI) se obtuvieron inóculos en medio LB líquido. Una vez crecidos, a las 24 horas, se centrifugaron 10 minutos a 4.000 rpm, y el *pellet* obtenido se resuspendió en agua destilada estéril. Se midió la Densidad Óptica (DO) a 560 nm, con el fin de determinar el volumen con el que se inocularían los sistemas con Cr(VI), de forma tal que todos comenzaran con una DO inicial de 0,1. Se realizaron 4 tratamientos en medio de cultivo LB: 0, 1, 3 y 5 ppm de Cr(VI). A tiempo inicial se midió la DO a 560 nm. Los cultivos se llevaron a agitación a 230 rpm a 30 °C durante 24 horas. Pasado ese tiempo, se midió nuevamente la DO a 560 nm para comparar la influencia de las concentraciones de metal ensayadas en el crecimiento de los microorganismos. Cada tratamiento se realizó por triplicado en dos ensayos independientes.

Inoculación de Salvinia biloba con Pseudomonas aeruginosa y Bacillus subtilis para evaluar la promoción del crecimiento vegetal

Para evaluar la interacción entre las bacterias y *S. biloba*, se emplearon sistemas experimentales en los que se cultivó una planta por recipiente (1,06 ± 0,13 g de peso fresco) en 100 mL de solución nutritiva. Se establecieron tres tratamientos: (1) sin inoculación, (2) inoculación con *B. subtilis*, y (3) inoculación con *P. aeruginosa*.

Los inóculos bacterianos se obtuvieron a partir de cultivos líquidos en medio LB incubados durante 24 horas. Luego, las células se recuperaron por centrifugación, se descartó el sobrenadante y el pellet se resuspendió en agua destilada estéril. Este resuspendido se utilizó para inocular las plantas, ajustando la DO inicial a 560 nm a 0,1.
Se registró el peso fresco, el número de hojas por planta y la longitud de raíces al inicio del experimento (momento de la inoculación) y a los 15 días. Cada tratamiento se realizó por triplicado y se repitió en dos ensayos independientes.

Inoculación de Salvinia biloba expuesta a distintas concentraciones de Cr(VI)

Se analizó si la inoculación con los microorganismos en estudio puede mejorar la tolerancia de la planta a las concentraciones de Cr(VI) ensayadas. Se obtuvieron inóculos en medio LB crecidos en agitación durante 24 horas. Posteriormente, se centrifugaron los cultivos y se resuspendió el *pellet* obtenido en agua destilada estéril. Este resuspendido bacteriano se utilizó para inocular frascos de vidrio con 100 mL de solución nutritiva y una planta de *S. biloba* en cada uno, con una DO inicial a 560 nm de 0,1. A cada sistema se le adicionó la cantidad necesaria de la solución stock previamente mencionada para llegar a las concentraciones: 0, 1, 3 y 5 ppm de Cr(VI). A tiempo inicial y a tiempo final (8 días) se registró la cantidad de hojas por planta, el largo de la raíz y el peso fresco. Cada tratamiento se analizó por triplicado, en dos ensayos independientes.

Análisis estadístico

Para el análisis entre la interacción de *S. biloba* y las concentraciones de Cr(VI) y para la evaluación del crecimiento de los

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

microorganismos a distintas concentraciones de Cr(VI) se realizó una Análisis de Varianza (ANOVA de un factor) seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey. En el caso del análisis de la promoción del crecimiento vegetal se realizó un ANOVA de un factor seguido de una prueba de comparación múltiple de Dunnett. Los resultados se consideraron significativamente distintos si $p < 0.05$. En todos los casos, se graficó el promedio de los datos obtenidos ± error estándar de la media (SEM). Se comprobó la normalidad de los datos utilizando el programa GraphPad Prism 8.0.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Ensayos de tolerancia de Salvinia biloba a distintas concentraciones de cromo

Las concentraciones utilizadas en este estudio fueron seleccionadas tomando como referencia informes sobre niveles ambientalmente relevantes (Prasad et al., 2021) y considerando que la concentración máxima permitida de Cr(VI) en efluentes industriales es de 2 ppm (Pushkar et al., 2021).

En la Fig. 1 se observa el aspecto de las plantas a tiempo inicial, a los 8 y a los 15 días de exposición a las distintas concentraciones de metal. El aumento de la concentración de Cr(VI) generó a los 8 y a los 15 días de tratamiento una alteración en las plantas, variando la coloración de las mismas y su turgencia.

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

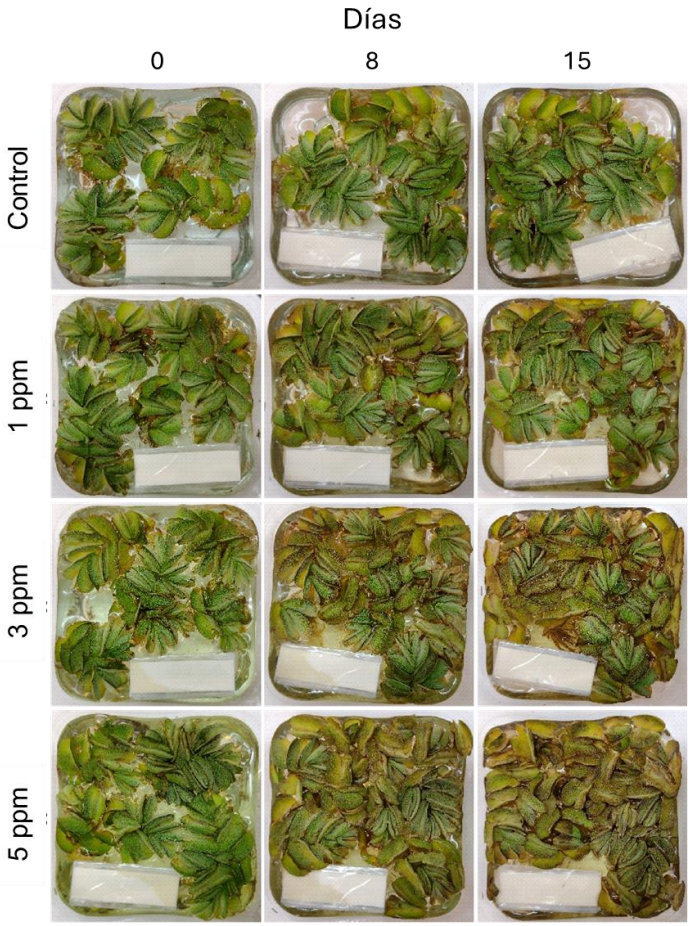

Figura 1. Plantas de *S. biloba* a tiempo inicial, 8 y 15 días de tratamiento con distintas concentraciones de Cr(VI).

Además, se registraron parámetros morfológicos indicadores del desarrollo de las plantas: peso fresco, largo de raíz, cantidad de hojas totales y hojas dañadas y se analizó su variación (Δ) entre el tiempo final e inicial (Fig. 2).

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

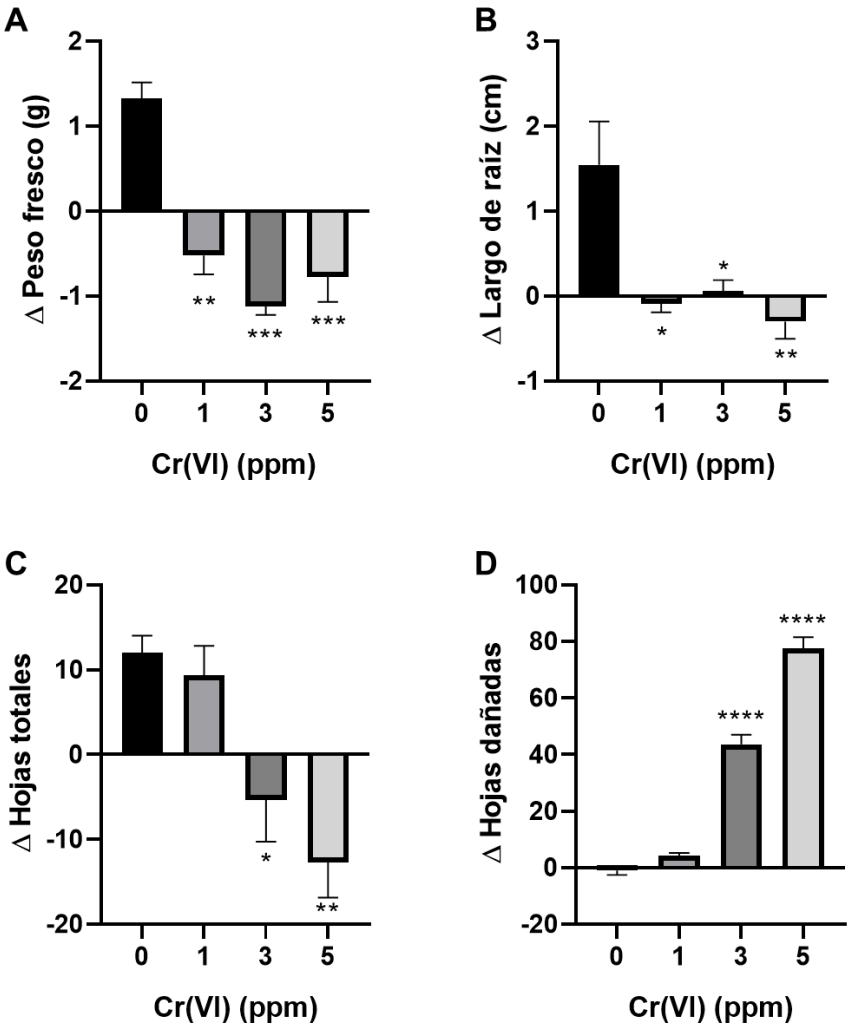

Figura 2. Variación (Δ) de parámetros morfológicos de individuos de *S. biloba* expuestos a distintas concentraciones de Cr(VI). Δ Peso fresco (A), Δ Largo de raíz (B), Δ Cantidad de hojas totales (C) y Δ Cantidad de hojas dañadas (D). Los asteriscos indican diferencias significativas contra el control (****p<0.0001; ***p<0.001; **p<0.01; *p<0.05).

El peso fresco y el largo de raíz solo se incrementaron en el tratamiento control y disminuyeron significativamente frente a la exposición con el metal (Fig. 2A y 2B). En cuanto a la cantidad de hojas totales (Fig. 2C), el valor se disminuyó significativamente en el caso de los tratamientos con 3 y 5 ppm de Cr(VI), mientras que la cantidad de hojas dañadas (Fig. 2D) aumentó significativamente al incrementar la concentración de Cr(VI), datos que se complementan con lo observado en la Fig. 1.

Los resultados muestran que *S. biloba* es capaz de tolerar hasta 5 ppm de Cr(VI), aunque con signos evidentes de estrés, como alteraciones en la coloración y pérdida de turgencia. La disminución significativa en peso fresco, largo de raíz y número de hojas, y el incremento de hojas

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

dañadas refleja un efecto fitotóxico progresivo asociado a la concentración del metal. Estos efectos han sido reportados en otras especies acuáticas expuestas a metales pesados, donde la acumulación de cromo genera alteraciones fisiológicas y estructurales en los tejidos (Emiliani *et al*., 2020). La capacidad de la planta para sobrevivir en estas condiciones sugiere su potencial como organismo modelo para estudios de tolerancia, aunque su rendimiento se ve claramente afectado a partir de concentraciones superiores a 1 ppm.

Análisis de tolerancia de Pseudomonas aeruginosa y Bacillus subtilis a distintas concentraciones de cromo

En la Fig. 3 se observan los resultados en la variación del crecimiento de *P. aeruginosa* (A) y *B. subtilis* (B) entre los tiempos final (24 h) e inicial a las concentraciones de Cr(VI) analizadas.

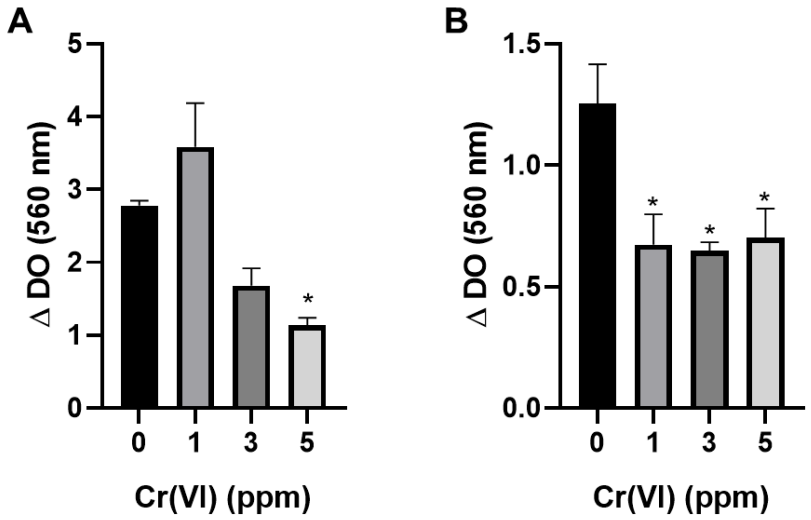

Figura 3. Crecimiento de *P. aeruginosa* (A) y *B. subtilis* (B) expresado como variación (Δ) de DO entre tiempos final (24 h) e inicial a distintas concentraciones de Cr(VI). Los asteriscos indican diferencias significativas contra el control (*p<0.05).

En el caso del crecimiento de *P. aeruginosa* (Fig. 3A), se observó que el crecimiento con 0, 1 y 3 ppm de Cr(VI) no presentó diferencias significativas. En cambio, el crecimiento en presencia de 5 ppm disminuyó significativamente. Por otro lado, al analizar el crecimiento de *B. subtilis* (Fig. 3B) se observó una disminución significativa del crecimiento en presencia de todas las concentraciones de Cr(VI) con respecto al control.

Ambos microorganismos mostraron capacidad de crecimiento en presencia de Cr(VI) hasta 5 ppm, lo que indica un grado de tolerancia importante frente a este contaminante. Si bien *P. aeruginosa* toleró mejor las concentraciones intermedias (1 y 3 ppm), *B. subtilis* mostró una disminución más marcada en todas las condiciones. A pesar de ello, ninguna de las concentraciones fue letal. Esto es relevante porque confirma que estos microorganismos podrían mantenerse

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

viables en un ambiente contaminado, condición necesaria para evaluar su aplicación conjunta con plantas en estrategias biotecnológicas. Estos resultados coinciden con estudios previos que reportan mecanismos de resistencia en estas bacterias frente a metales pesados, como la producción de EPS, bombas de eflujo o sistemas de reducción (Chellaiah, 2018; Teitzel y Parsek, 2003).

Inoculación de Salvinia biloba con Pseudomonas aeruginosa y Bacillus subtilis para evaluar la promoción del crecimiento vegetal

En la Fig. 4 se observan las variaciones (Δ) entre tiempo final (15 días) e inicial en los parámetros analizados.

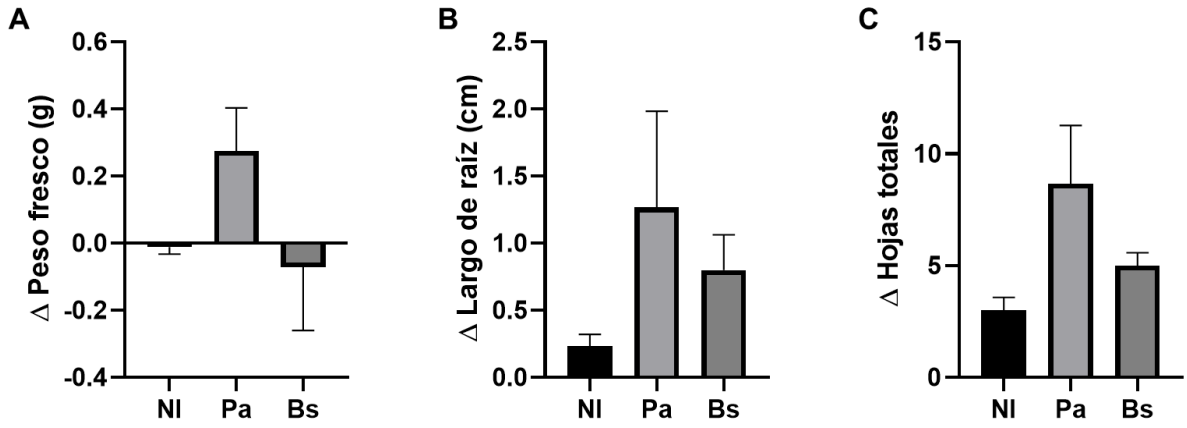

Figura 4. Variación (Δ) de parámetros morfológicos entre tiempo final (15 días) e inicial de individuos de *S. biloba* no inoculados (Nl) e inoculados con *P. aeruginosa* (Pa) y *B. subtilis* (Bs): peso fresco (A), largo de raíz (B) y cantidad de hojas totales (C).

Con respecto al peso fresco de las plantas (Fig. 4A), se observó una tendencia al incremento del 15,6% al inocular con *P. aeruginosa*, aunque no de forma significativa. No se observaron diferencias relevantes entre los tiempos inicial y final en las muestras no inoculadas y las inoculadas con *B. subtilis*.

Por otro lado, si bien las plantas no inoculadas incrementaron su largo de raíz (Fig. 4B) en un 7% en los 15 días de tratamiento, este aumento fue del 37% al inocular con *P. aeruginosa* y del 23,3% al inocular con *B. subtilis*, indicando que, aunque estas diferencias no fueron significativas, la inoculación podría tener un efecto positivo en este parámetro.

Finalmente, en relación con la cantidad de hojas por planta (Fig. 4C), las no inoculadas incrementaron la cantidad de hojas en un 14% en 15 días. Este incremento fue mucho mayor en los tratamientos inoculados, encontrando un 46,8 y 23,3% de aumento al inocular con *P. aeruginosa* y *B. subtilis,* respectivamente. Aunque se observó una tendencia al aumento en este parámetro morfológico, estas diferencias no fueron significativas. En este caso, no se analizó la cantidad de hojas dañadas debido a que, al no estar en presencia del contaminante, no fue relevante analizar este parámetro.

Por lo tanto, la inoculación con ambas bacterias mostró una tendencia a mejorar el desarrollo de *S. biloba*, especialmente en

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

el caso de *P. aeruginosa*. Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas, se observó una tendencia al aumento en peso fresco, longitud de raíz y número de hojas totales. Estos resultados sugieren que ambas bacterias podrían ejercer un efecto bioestimulante, compatible con su rol como PGPB. Estos efectos podrían estar relacionados con la producción de fitohormonas o con la mejora en la disponibilidad de nutrientes, mecanismos comúnmente atribuidos a estas especies bacterianas.

Inoculación de Salvinia biloba expuesta a distintas concentraciones de cromo

Se analizó si la inoculación con los microorganismos podría mejorar la tolerancia de *S. biloba* al Cr(VI). A tiempo inicial y final (8 días, tiempo en el que ya se observó un deterioro de la morfología de las plantas en la Fig. 1) se analizó la variación del peso fresco de planta, el largo de raíz y la cantidad de hojas totales (Fig. 5A, 5B y 5C, respectivamente).

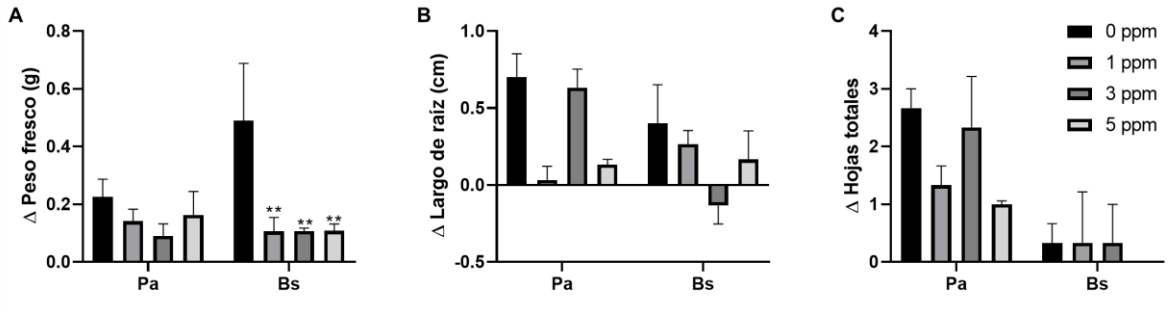

Figura 5. Variación (Δ) entre el tiempo inicial y final (8 días) del peso fresco (A), largo de raíz (B) y cantidad de hojas totales (C) de plantas de *S. biloba* inoculadas con *P. aeruginosa* (Pa) y *B. subtilis* (Bs) en presencia de 0, 1, 3 y 5 ppm de Cr(VI). Los asteriscos indican diferencias significativas entre los tratamientos del mismo microorganismo (**p<0.01).

Teniendo en cuenta los resultados de la exposición a Cr(VI) sin la presencia de microorganismos que se muestran en la Fig. 2, en los que se observó una disminución del peso freso (Fig. 2A) y del largo de raíz (Fig. 2B) a partir de la adición de 1 ppm Cr(VI) y una disminución de la cantidad de hojas totales (Fig. 2C) a partir de la exposición a 3 ppm de Cr(VI), pudo observarse que la aplicación de ambos microorganismos mejoró todos los parámetros analizados (Fig. 5). En cuanto al peso fresco (Fig. 5A), la mejora fue igual en todas las concentraciones de Cr(VI) ensayadas en el caso de *P. aeruginosa*, pero al aplicar *B. subtilis* la misma fue menor significativamente que en el tratamiento sin Cr(VI). En relación con el largo de raíz y la cantidad de hojas totales, no hubo diferencias significativas en cuanto a la aplicación de ambos microorganismos en todas las concentraciones analizadas (Fig. 5B y 5C), lo cual mejora la situación observada la exposición a Cr(VI) sin inóculo (Fig. 2B). Sin embargo, las variaciones fueron mayores en el caso de aplicación de *P. aeruginosa* con respecto a B. *subtilis*, indicando que la inoculación con el este microorganismo fue más eficiente en cuanto a la promoción del crecimiento vegetal de *S. biloba* en presencia de Cr(VI). La inoculación con *P. aeruginosa* y *B. subtilis* en condiciones de exposición a Cr(VI) permitió mitigar los efectos

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

fitotóxicos del metal en *S. biloba*. Los parámetros morfológicos analizados tendieron a mejorar con respecto a los controles no inoculados, indicando una mayor tolerancia al estrés por Cr(VI). Este efecto fue más notorio con *P. aeruginosa*, lo que sugiere una interacción más eficiente con la planta en estas condiciones. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que las bacterias promotoras del crecimiento pueden no solo estimular el desarrollo vegetal en condiciones normales, sino también desempeñar un papel protector frente a contaminantes, posiblemente mediante la producción de antioxidantes, quelación de metales o atenuación del estrés oxidativo.

Por otro lado, se observó que a los 8 días de tratamiento en las concentraciones de Cr(VI), las plantas inoculadas con ambos microorganismos presentaron una menor variación en la coloración, turgencia y disposición de las hojas (Fig. 6, plantas inoculadas con *P. aeruginosa*) con respecto a lo observado en el ensayo de tolerancia al metal sin aplicación de microorganismos en el mismo tiempo (Fig. 1). La concentración más elevada (5 ppm) presentó efectos en la coloración debido a procesos de clorosis/necrosis del tejido. Sin embargo, estos cambios no fueron tan marcados como en el caso de las plantas no inoculadas, ni se evidenció un cambio en la turgencia de la planta, tal como se observó en la Fig. 1.

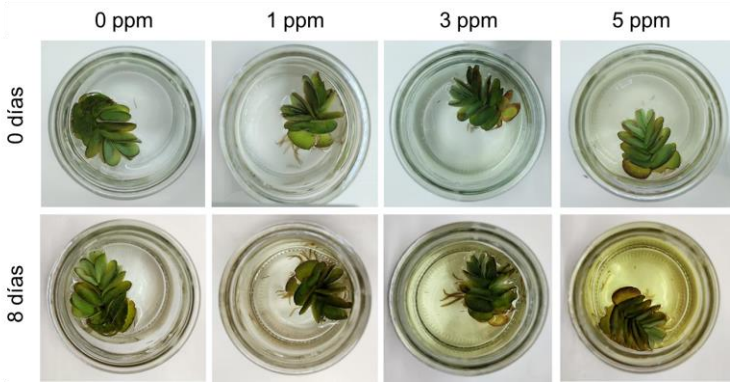

Figura 6. Plantas de *S. biloba* inoculadas con *P. aeruginosa* expuestas a distintas concentraciones de Cr(VI) (0, 1, 3 y 5 ppm) a tiempo inicial y final (0 y 8 días).

Las observaciones visuales confirmaron los resultados cuantitativos, mostrando que las plantas inoculadas presentaron menor clorosis, necrosis y pérdida de turgencia que las no inoculadas. Esto refuerza el efecto positivo de los microorganismos sobre la salud general de las plantas. Aunque no se cuantificaron parámetros fisiológicos o la acumulación de cromo, estas observaciones apoyan la idea de que las PGPB podrían contribuir a amortiguar los efectos del metal.

CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar si la inoculación con bacterias promotoras del crecimiento vegetal mejora la tolerancia de *S. biloba* al Cr(VI).

Se determinó que *S. biloba* puede sobrevivir a concentraciones de hasta 5 ppm de Cr(VI), aunque con signos de fitotoxicidad. Ambas bacterias analizadas, *P. aeruginosa* y *B. subtilis*, también

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

toleraron dichas concentraciones, lo que permite su uso conjunto con la planta.
La inoculación con PGPB en ausencia del contaminante mostró una tendencia positiva en parámetros morfológicos como el largo de raíz y la cantidad de hojas. En presencia de Cr(VI), las plantas inoculadas presentaron una mejora en comparación con aquellas no inoculadas, especialmente con *P. aeruginosa*.

Estos resultados permiten concluir que la inoculación bacteriana mejora la tolerancia de *S. biloba* al Cr(VI) y promueve su desarrollo en condiciones de estrés. La aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal representa una estrategia eficaz para reducir los efectos fitotóxicos del metal y avanzar hacia sistemas biotecnológicos de remediación más eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-Daim, M. M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M., Kalderis, D. (2020). *Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: a review*. Sustainability 12(5):1927. doi: 10.3390/su12051927

Briffa, J., Sinagra, E., Blundell, R. (2020). *Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans*. Heliyon 6(9): e04691.

Chellaiah, E. R. (2018). *Cadmium (heavy metals) bioremediation by Pseudomonas aeruginosa: a minireview*. Applied water science, (6):1-0. doi: 10.1007/s13201-018-0796-5

Emiliani, J., Llatance Oyarce, W. G., Bergara, C. D., Salvatierra, L. M., Novo, L. A., Pérez, L. M. (2020). *Variations in the phytoremediation efficiency of metal-polluted water with Salvinia biloba: prospects and toxicological impacts*. Water 12(6):1737. doi: 10.3390/w12061737

Emiliani, J., Oyarce, W. G., Salvatierra, L. M., Novo, L. A., Pérez, L. M. (2021). *Evaluation of cadmium bioaccumulation-related physiological effects in Salvinia biloba: An insight towards its use as pollutant bioindicator in water reservoirs*. Plants 10(12):2679. doi: 10.3390/plants10122679

Kong, Z., Glick, B. R. (2017). *The role of plant growth-promoting bacteria in metal phytoremediation*. Advances in microbial physiology 71:97-132. doi: 10.1016/bs.ampbs.2017.04.001

Llatance Oyarce, W., Emiliani, J., Bergara, C. D., Salvatierra, L. M., Pérez, L. M. (2019). *Caracterización de los mecanismos de fitorremediación de Salvinia sp. frente a la exposición a metales pesados y su impacto sobre la fisiología vegetal*. Energeia 16(16):37-45. ISSN: 1668-1622

Mahapatra, S., Yadav, R., Ramakrishna, W. (2022). *Bacillus subtilis impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde*. Journal of Applied Microbiology 132(5):3543-3562. doi: 10.1111/jam.15480

Mendes, E. J., Malage, L., Rocha, D. C., Kitamura, R. S. A., Gomes, S. M. A., Navarro-Silva, M. A., Gomes, M. P. (2021). *Isolated and combined effects of glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid on the physiology and water remediation capacity of Salvinia molesta*. Journal of Hazardous Materials, 417: 125694. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125694

Mesa-Marín, J., Pérez-Romero, J. A., Redondo-Gómez, S., Pajuelo, E., Rodríguez-Llorente, I. D., Mateos-Naranjo, E. (2020*). Impact of plant growth promoting bacteria on Salicornia ramosissima ecophysiology and heavy metal phytoremediation capacity in estuarine soils*. Frontiers in Microbiology 11:553018. doi: 10.3389/fmicb.2020.553018

Volumen 13 N°1, año 2025
ISSN: 2347-0941

Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., Babalola, O. O. (2017). *Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria*. World Journal of Microbiology and Biotechnology 33(11):1-6. doi: 10.1007/s11274-017-2364-9

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A. (2020). *Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión*. Entre Ciencia e Ingeniería 14(27):9-18. doi: 10.31908/19098367.1734

Prasad, S., Yadav, K.K., Kumar, S., Gupta, N., Cabral-Pinto, M.M., Rezania, S., Alam. J. (2021). *Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approach*. Journal of Environmental Management 285: 11217. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112174

Pushkar, B., Sevak, P., Parab, S., Nilkanth, N. (2021). *Chromium pollution and its bioremediation mechanisms in bacteria: a review*. Journal of Environmental Management 287:112279. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112279

Radhapriya, P., Ramachandran, A., Anandham, R., Mahalingam, S. (2015). *Pseudomonas aeruginosa RRALC3 enhances the biomass, nutrient and carbon contents of Pongamia pinnata seedlings in degraded forest soil*. PloS one; 10(10):e0139881. doi: 10.1371/journal.pone.0139881

Ramakrishna, W., Yadav, R., Li, K. (2019). *Plant growth promoting bacteria in agriculture: two sides of a coin*. Applied Soil Ecology 138: 10-18. doi: 10.1016/j.apsoil.2019.02.019

Rizzo, A., Daga, R., Arcagni, M., Perez Catán, S., Bubach, D., Sánchez, R., Ribeiro Guevara. S., Arribére, M. A. (2020). *Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte*. Ecología Austral 20(2):155-171. ISSN 1667-782X

Sambrook, J., Fritsch, E. F., Maniatis, T. (1989). *Molecular cloning: a laboratory manual*. Cold spring harbor laboratory press.

Teitzel, G. M., Parsek, M. R. (2003). *Heavy metal resistance of biofilm and planktonic Pseudomonas aeruginosa*. Applied and environmental microbiology, 69(4):2313-2320. doi: 10.1128/AEM.69.4.2313-2320.2003

Yadav, M., Gupta, R., Sharma, R. K. (2019). *Green and sustainable pathways for wastewater purification*. In: Advances in water purification techniques, Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-814790-0.00014-4