

Reintroducción del cultivo de cáñamo industrial (*Cannabis sativa* L.) en su capacidad como fitorremediador en el territorio de la Provincia de Buenos Aires*

Liliana Elsegood**

Rosana Echarri***

Alejandro Paoloni****

Luis Martín Principe*****

Alejandro Miguel Sánchez*****

Alejandro Angel Mancuso*****

Silvana Lorena Colman*****

Jorge Pizarro*****

Resumen

Este proyecto de la UNDAV explora el uso del cáñamo como herramienta de fitorremediación en suelos contaminados de la Cuenca Matanza-Riachuelo. Mediante un invernadero instalado en la universidad y el trabajo conjunto con ACUMAR, la organización IDEAL y la cooperativa LARA, la iniciativa articuló saberes académicos y territoriales frente a una problemática ambiental crítica. Los ensayos demostraron que el cáñamo puede crecer en suelos con cadmio, cromo y plomo sin pérdida de biomasa, y que es capaz de acumular estos metales en raíces y hojas, lo que evidencia su potencial para futuras estrategias de recuperación ambiental. El proyecto resalta el valor ambiental y productivo del cultivo y su aporte al fortalecimiento comunitario, posicionando al cáñamo como alternativa sostenible para la remediación de suelos y el desarrollo territorial.

* Recibido:02/12/2025. Aceptado: 19/06/2026. Publicado: 30-07-2026

** Universidad Nacional de Avellaneda; Argentina. Correo electrónico: lelsegood@gmail.com

*** IDEAL Asociación Civil; Argentina. Correo electrónico: roo.echarri@gmail.com

**** Universidad Nacional de Avellaneda; Argentina. Correo electrónico: adpaoloni@gmail.com

***** Universidad Nacional de Avellaneda; Argentina. Correo electrónico: lmpincipe@undav.edu.ar

***** Cooperativa LARA. Universidad de Buenos Aires; Argentina. Correo electrónico: sancheza@agro.uba.ar

***** Cooperativa LARA; Argentina. Correo electrónico: mancusoale01@gmail.com

***** Cooperativa LARA. Universidad Nacional de Mar del Plata; Argentina. Correo electrónico: colmansilvana@gmail.com

***** Cooperativa LARA; Argentina. Correo electrónico: pizarrobsas@gmail.com

Asimismo, la experiencia reafirma el rol de la universidad pública como agente de transformación social comprometido con soluciones integrales construidas junto al territorio.

Palabras clave: biorremediación, cáñamo, metales, extensión universitaria, territorio.

Summary

This UNDAV project explores the use of hemp as a phytoremediation tool in contaminated soils of the Matanza-Riachuelo Basin. Through a greenhouse installed at the university and joint work with ACUMAR, the IDEAL organization and the LARA cooperative, the initiative articulated academic and territorial knowledge in the face of a critical environmental problem. The trials showed that hemp can grow in soils with cadmium, chromium and lead without loss of biomass, and that it is capable of accumulating these metals in roots and leaves, highlighting its potential for future environmental recovery strategies. The project highlights the environmental and productive value of the crop and its contribution to community strengthening, positioning hemp as a sustainable alternative for soil remediation and territorial development. Likewise, the experience reaffirms the role of the public university as an agent of social transformation committed to comprehensive solutions built together with the territory.

Keywords: bioremediation, hemp, metals, university extension, territory.

Resumo

Este projeto do UNDAV explora o uso do cânhamo como ferramenta de fitorremediação em solos contaminados da Bacia Matanza-Riachuelo. Por meio de uma estufa instalada na universidade e do trabalho conjunto com a ACUMAR, a organização IDEAL e a cooperativa LARA, a iniciativa articulou o conhecimento acadêmico e territorial diante de um problema ambiental crítico. Os testes mostraram que o cânhamo pode crescer em solos com cádmio, cromo e chumbo sem perda de biomassa, e que é capaz de acumular esses metais em raízes e folhas, destacando seu potencial para futuras estratégias de recuperação ambiental. O projeto destaca o valor ambiental e produtivo da cultura e sua contribuição para o fortalecimento comunitário, posicionando o cânhamo como uma alternativa sustentável para a remediação do solo e o desenvolvimento territorial. Da mesma forma, a experiência reafirma o papel da universidade pública como agente de

transformação social comprometida com soluções abrangentes construídas em conjunto com o território.

Palavras-chave: biorremediação, cânhamo, metais, extensão universitária, território.

Introducción

Durante décadas, las actividades humanas han incorporado grandes cantidades de contaminantes en el suelo, el agua y la atmósfera, tales como metales pesados, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo; como consecuencia de procesos industriales tales como la minería, las emisiones gaseosas, la aplicación de plaguicidas y la generación de residuos urbanos (Shah y Daverey, 2020).

Estos contaminantes pueden acumularse a lo largo de las cadenas tróficas, provocando efectos perjudiciales en plantas, animales y seres humanos, entre ellos alteraciones del sistema endocrino, afectaciones inmunológicas, trastornos neurológicos y cáncer (Nedjimi, 2009).

Las principales fuentes de contaminación por metales pesados en el ambiente provienen de la extracción minera, la combustión y los efluentes industriales. El arsénico (As), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr) y aluminio (Al) son los principales metales pesados que provocan toxicidad tanto en la flora como en la fauna de los ecosistemas del suelo. A pesar de que algunos metales, como el hierro (Fe), cobre (Cu), selenio (Se) y zinc (Zn), son indispensables en bajas concentraciones, su acumulación en niveles elevados puede resultar altamente tóxica para el ambiente (Ashraf et al., 2019).

Los métodos químicos empleados para la descontaminación de metales pesados, tales como la excavación, la precipitación, el tratamiento térmico, la electrorremediación y la lixiviación química, continúan siendo costosos y su eficacia depende tanto del tipo de contaminante como de las características edáficas (Nedjimi y Daoud, 2009). Entre las principales limitaciones de estas técnicas se incluyen la modificación de las propiedades del suelo, en particular del pH, el riesgo de pérdida de fertilidad, la aplicabilidad restringida a pequeña escala y la generación de subproductos no deseados.

Como alternativa, la fitorremediación es un proceso que se basa en la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar

contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo (Nedjimi, 2021). A diferencia de los métodos fisicoquímicos, la fitorremediación es una tecnología ambiental sostenible, de bajo costo y ampliamente reconocida por su eficacia en la mitigación de contaminantes en diversos ecosistemas (Tonelli et al., 2022).

Las plantas pueden clasificarse como tolerantes y/o hiperacumuladoras de metales pesados cuando presentan un crecimiento rápido, alta producción de biomasa y la capacidad de extraer y acumular grandes cantidades de estos metales en sus partes aéreas, sin mostrar signos de toxicidad al crecer en suelos contaminados (Kramer, 2010). Por lo tanto, esta tecnología verde puede resultar muy útil para la remediación de suelos o agroecosistemas contaminados con metales pesados.

Hasta el momento, se han identificado e investigado numerosas especies vegetales con capacidad fitorremediadora, son generalmente hierbas anuales sin valor económico, pero con un alto potencial de extracción, es decir, hiperacumuladoras (Rheay et al., 2021).

Cannabis sativa para fitorremediación

El cáñamo, *Cannabis sativa* L., es una planta herbácea anual con un ciclo de vida de entre cuatro y ocho meses, naturalmente dioica, que se reproduce por propagación de semillas. Las plantas pueden alcanzar hasta cinco metros de altura y desarrollar una raíz pivotante que penetra hasta dos metros en el suelo (Chabbert et al., 2013). La mayor parte de la biomasa aérea del cáñamo proviene del tallo lignocelulósico, alto y robusto, que se ha utilizado como fuente de fibra durante miles de años. Los distintos tipos de fibra del cáñamo pueden emplearse en la fabricación de una amplia gama de productos textiles e industriales, como telas, papel y pulpa, materiales aislantes, tableros compuestos, plásticos, pinturas, selladores y biocombustibles (Small, 2015). El resto de la biomasa aérea está compuesto por hojas, semillas e inflorescencias. Las semillas de cáñamo son altamente valoradas por su aceite rico en ácidos grasos, que representa aproximadamente entre el 25 % y el 35 % de la masa total de la semilla. El resto está constituido por un 20-35 % de proteínas, un 20-30 % de carbohidratos y fibra (Leizer et al., 2000). Esta composición permite utilizar las semillas de cáñamo en diversos productos, como alimentos y forrajes, nutracéuticos, cosméticos y combustibles (Small, 2015).

Al mismo tiempo, el cáñamo representa una especie vegetal con alto potencial para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, radionúclidos e hidrocarburos aromáticos policíclicos, sumado a que es considerado un candidato para sistemas de producción más sostenibles (Rheay et al 2021).

El poder fitoextractor del cáñamo sobre metales pesados y radionúclidos ha sido demostrado en numerosos estudios (Tabla 1), distribuyéndose los contaminantes en toda la planta en distintas concentraciones, desde donde pueden ser cosechados. El potencial de fitoextracción del cáñamo depende de la identidad y concentración del contaminante, las características del suelo, la ubicación geográfica y la variedad de cáñamo utilizada.

Tabla 1. Absorción de metales por fracción de biomasa vegetal de *C. sativa*

Compuesto	Tejido vegetal aéreo	Raíces	Referencia
Cadmio	9.4-73.0 $\mu\text{g g}^{-1}$ (hojas/tallo)	109.2-1368.2 $\mu\text{g g}^{-1}$	Citterio et al. (2003)
	0.8-3.5 ppm (hoja/tallo/semilla)		Linger et al. (2002)
	0-3 mg kg^{-1} (parte aérea)		Meers et al. (2005)
	11.4-33.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ (parte aérea)	217-481 $\mu\text{g g}^{-1}$	Shi et al. (2012)
	1.3-4 mg kg^{-1} (parte aérea)		Mihoc et al. (2012)
	151 mg kg^{-1} (hojas)		Ahmad et al. (2016)
Cromo	1.2-1.4 $\mu\text{g g}^{-1}$ (hojas)	6.2-9.0 $\mu\text{g g}^{-1}$	Citterio et al. (2003)
Plomo	0.21-1.12 mg kg^{-1} (hojas/tallo)	1.30-1.88 mg kg^{-1}	Di Candilo et al. (2004)
	1.8-22.4 ppm (hojas/tallo/semillas)		Linger et al. (2002)
	1-7 mg kg^{-1} (parte aérea)		Meers et al. (2005)

La acumulación total de metales en las distintas partes de la planta, en relación con su masa total, presenta un amplio rango de concentraciones relativas. Por ejemplo, una elevada concentración de metal pesado en la biomasa de las semillas (8 %-10 % de la masa total de la planta) resulta prácticamente insignificante en comparación con la cantidad total de metal presente en otras partes de la planta (Linger et al., 2002). Aunque los bajos niveles de contaminantes en la planta completa pueden limitar su uso en productos de consumo, ello no reduce su potencial para aplicaciones en productos industriales o en la producción de bioenergía.

Por lo tanto, la combinación de fitorremediación con la producción de bioproductos relacionados al grano o fibras constituye una estrategia eficaz para optimizar la viabilidad económica de los proyectos de descontaminación de suelos, debido a la elevada producción de biomasa aérea y al profundo sistema radicular del cáñamo.

Con respecto a la producción de biomasa, otra de las virtudes del cáñamo como fitorremediador, es que su crecimiento generalmente no se ve inhibido por niveles bajos de algunos metales pesados en el suelo. Nissim et al. (2018) demostraron que, en suelos con concentraciones reducidas de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, el cultivo mantuvo una producción significativa de biomasa aérea sin alteraciones en la altura de las plantas. De manera concordante, en condiciones de contaminación moderada por As, Pb y V, los rendimientos y rasgos morfológicos resultaron comparables a los de plantas cultivadas en suelos no contaminados, sin diferencias estadísticamente significativas en la altura, el diámetro del tallo o la producción de inflorescencias (Pietrini et al., 2019).

De esta manera, dada su capacidad como fitorremediador, su sostenibilidad y versatilidad por sus múltiples usos, el cáñamo representa una oportunidad para el desarrollo de la economía circular. Su cultivo y procesamiento ofrecen soluciones innovadoras que contribuyen a la transición hacia un futuro más sostenible y responsable con el planeta.

Si bien el cannabis ofrece múltiples oportunidades productivas, científicas y sociales, su legalización avanza de manera gradual y compleja. La reintroducción del cultivo de cáñamo industrial en Argentina constituye un objetivo estratégico para recuperar una cadena productiva históricamente desaprovechada y posicionar al país dentro de un mercado global en expansión, en el que el cáñamo ya se cultiva en más de treinta países. Argentina cuenta con antecedentes productivos concretos: durante la década de 1970, las empresas Linera Bonaerense y Algodonera Flandria, en la localidad de Jáuregui (partido de Luján), se destacaron como productoras de cáñamo industrial, hasta que esta actividad fue interrumpida por la Ley N° 21.671 de 1977, que equiparó al cáñamo (sin THC psicoactivo) con los estupefacientes. Esta interrupción significó casi cinco décadas sin producción industrial de la planta en el país, a pesar de su comprobada viabilidad agronómica y de los beneficios económicos y sociales que en su momento había anticipado Manuel Belgrano (Stawski y Osler, 2023).

El nuevo marco normativo ofrece hoy las condiciones para revertir ese vacío. La Ley N° 27.350 (2017) abrió la puerta a la investigación científica del cannabis con fines medicinales, y la Ley N° 27.669 (2022) amplió ese marco al regular específicamente la cadena de producción, comercialización e industrialización del cáñamo. A partir de este marco, se están desarrollando experiencias productivas en distintos municipios, universidades e instituciones científicas, orientadas a evaluar la adaptabilidad agronómica del cultivo y a generar la evidencia técnica necesaria para su reintroducción. En este sentido, este proyecto se propone contribuir activamente a este proceso, promoviendo la reintroducción del cáñamo en el entramado productivo nacional como una vía concreta para articular salud, ciencia, producción y economía social.

Cuenca Matanza Riachuelo.

En Argentina, el río Matanza-Riachuelo está fuertemente afectado por la descarga de aguas residuales y otros impactos típicos de los ecosistemas urbanos. Ubicado en la región centro-este de la llanura pampeana, abarca unos 2200 km² y tiene una longitud de 64 km, desde los arroyos Rodríguez, Cañuelas y Morales hasta su desembocadura como Riachuelo. La cuenca, situada en la zona más urbanizada e industrializada del país, concentra cerca de tres millones de habitantes, de los cuales el 55 % carece de red de saneamiento. El río recibe efluentes de tres plantas depuradoras y de numerosas industrias, curtiembres, frigoríficos, químicas, petroquímicas y galvanoplastias, además de residuos sólidos urbanos y basurales a cielo abierto.

La Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR), creada en 2006, es el ente público interjurisdiccional y máxima autoridad ambiental de la cuenca. Actúa en el marco del Plan Integral de Saneamiento Ambiental, coordinando a los distintos actores para abordar las problemáticas de la cuenca. El plan incluye diversas líneas de acción con proyectos orientados a mejorar la calidad de vida, recomponer el ambiente (agua, aire y suelo) y prevenir daños con un enfoque de previsión razonable.

El rol de la universidad Nacional de Avellaneda

El principio de integralidad de las funciones universitarias - docencia, investigación y extensión - constituye uno de los pilares sobre los cuales se sustenta el modelo de

universidad pública en América Latina. Esta concepción promueve la superación de las tradicionales fragmentaciones de producción de conocimiento.

Al presente proyecto le subyace la formación académica y la vinculación con las organizaciones del territorio, bajo un encuadre de prácticas interdisciplinarias, dialógicas y socialmente comprometidas. En este sentido, la Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV) asume la integralidad como eje estructurante de su proyecto institucional, impulsando experiencias que articulan la generación de saberes científicos con la intervención en problemáticas territoriales concretas.

En este marco, el proyecto de extensión sobre fitorremediación mediante el uso de cáñamo se propone contribuir a la recuperación de suelos contaminados a través de estrategias biotecnológicas sostenibles, al tiempo que promueve instancias formativas y de interacción con actores sociales vinculados a la gestión ambiental.

La elección del cáñamo como especie de estudio responde a su reconocida capacidad de absorción y acumulación de metales pesados, su rápido crecimiento y su adaptabilidad a diversas condiciones edáficas, características que lo convierten en una herramienta de interés para la mitigación de impactos derivados de la actividad industrial.

El desarrollo de este estudio problematiza, además, las formas en que la investigación científica y la extensión universitaria se integran en prácticas de conocimiento situado, que trascienden la mera transferencia tecnológica para configurar espacios de construcción colectiva entre la universidad y los demás actores sociales.

En este sentido, el trabajo tiene por objetivo experimentar y analizar los procesos de fitorremediación con cáñamo, experiencia desarrollada en la UNDAV desde la perspectiva de la integralidad, generando aportes al fortalecimiento de la función social de la universidad y a la consolidación de enfoques ambientales participativos y sostenibles.

Materiales y Métodos

Este proyecto dio lugar al primer cultivo de cannabis en la UNDAV, sede Piñeyro. Para lo cual se construyó un invernadero dentro de la universidad (Figura 1A), lo que promovió la vinculación de la comunidad educativa con este proyecto interdisciplinario, en el cual también participaron actores de la sociedad civil (IDEAL Avellaneda), una Cooperativa de la región (LARA) y representantes del sector privado con experiencia en la temática.

Material vegetal y condiciones de cultivo

Se utilizaron semillas de cáñamo, *Cannabis sativa* L. cedidas por la empresa Ananda Pampa. Se realizaron dos ensayos de cultivo en invernadero (Figura 1) para los cuales se utilizó suelo colectado en la Cuenca baja del Matanza Riachuelo, Loc. Ing. Budge (coordenadas: -34.727542148663545, -58.4833583889129). La extracción y el traslado del suelo contaminado se realizó con la supervisión del personal del técnico especializado de ACUMAR, un ingeniero agrónomo de la Cooperativa Lara y técnicos ambientales de la UNDAV, siguiendo un protocolo de seguridad para minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Se extrajeron 2 m³ de suelo, el cual se tamizó para descartar los residuos y piedras presentes. Posteriormente, se analizó una muestra para constatar la presencia de metales cadmio, cromo y plomo a través del servicio del Laboratorio Ambiental de la UNDAV mediante Espectrometría de absorción atómica (AAS). Los valores obtenidos fueron 0.1 ± 0.04 ppm para Cadmio, 94.3 ± 0.36 ppm para Cromo y 95.5 ± 0.71 ppm para Plomo. La tierra tamizada se mezcló en proporción 1:1 con tierra negra proveniente del vivero “Nuevo Vivero Hanasono” ubicado en camino Gral. Belgrano 4390 Villa Dominico – Avellaneda- Provincia de Buenos Aires y se denominó “suelo contaminado” y como control se utilizó solo la tierra negra, la cual se denominó “suelo limpio”. Se llevaron a cabo dos ensayos:

Ensayo 1: se realizó en bancales de madera (Figura 1C) en los cuales se sembraron 308 semillas en cada uno. Se utilizaron cuatro bancales con suelo contaminado y cuatro con suelo limpio como control. Se llevó a cabo durante 101 días, desde el 25 de febrero de 2025 al 5 de junio de 2025.

Ensayo 2: se realizó en macetas individuales (1 planta/maceta) de 30 L. Se utilizaron diez macetas con suelo contaminado y diez con suelo limpio como control. Se llevó a cabo durante 207 días, desde el 10 de marzo de 2025 al 2 de octubre de 2025.

Para ambos ensayos se utilizó un fotoperiodo 18/6, luz/oscuridad con suplementación lumínica y riego automatizado con agua dechlorada. Se realizó fertilización con NPK 15:15:15, a demanda.

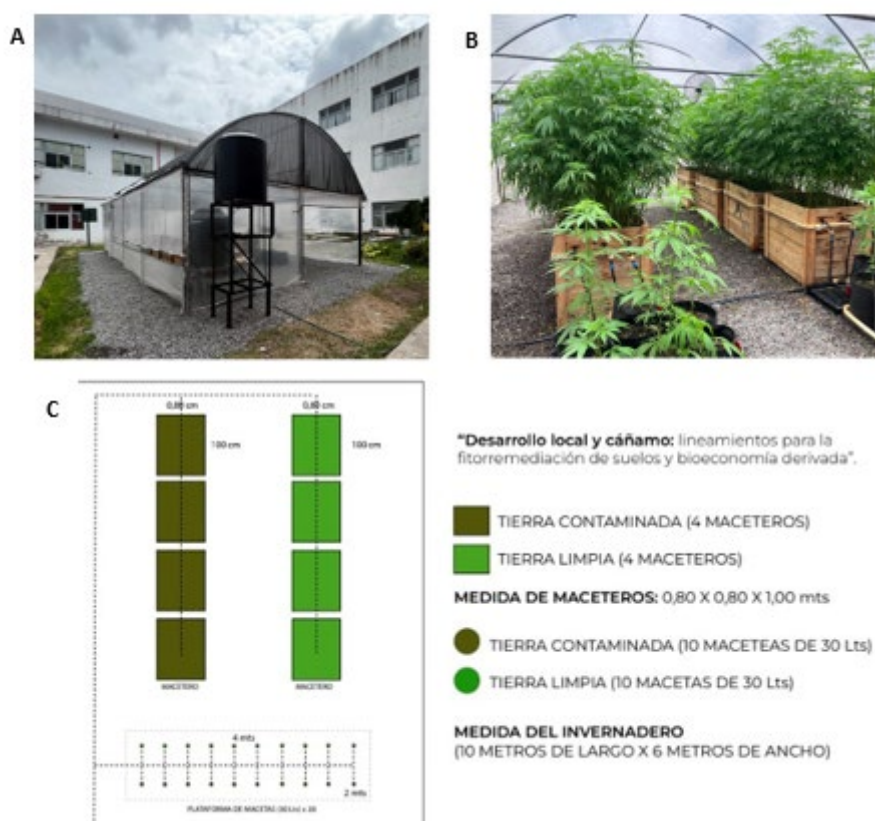


Figura 1. Diseño del ensayo de fitorremediación con cáñamo. A) Invernadero construido en las instalaciones de la UNDAV, Sede Piñeyro, B) Foto representativa de los ensayos con plantas de cáñamo, C) Diseño del ensayo 1 con maceteros/bancales y del ensayo 2 con macetas.

Análisis de los parámetros de crecimiento

Los parámetros de crecimiento se analizaron al finalizar los ensayos de cultivo. Para el ensayo 1 se seleccionó un área de muestreo de 30 x 30 cm dentro de cada bancal y se tomaron veinte plantas para los análisis. Para el ensayo 2 se analizaron las diez plantas de forma individual. Se midió el contenido de clorofila con SPAD (Minolta, Japan) a partir de tres hojas totalmente desarrolladas ubicadas en los tres nudos superiores al entrenudo central. Se cortaron las plantas al ras del suelo y se midió la altura y la longitud del entrenudo central del tallo con cinta métrica, y su diámetro con calibre. Se separaron las hojas de los tallos, los cuales se trozaron en secciones de 30 cm, y se cuantificó el peso fresco (PF) del material vegetal. Se colectaron las raíces, se limpiaron con agua destilada y se cuantificó su PF. Posteriormente, las muestras vegetales se secaron estufa a 65 °C hasta peso constante y se cuantificó el peso seco (PS) de tallos y raíces.

Análisis de metales cadmio, cromo y plomo en las muestras de tejido vegetal y en el suelo

Las muestras de material vegetal secas (hojas, tallo y raíces) se trituraron con mortero y se incineraron en horno mufla. Posteriormente se realizó una digestión ácida y se analizaron los metales cadmio, cromo y plomo por Espectrometría de absorción atómica (AAS) utilizando el servicio del Laboratorio Ambiental de la UNDAV.

Para el análisis de las muestras de suelo se tomó una muestra de cada bancal del área de muestra de 30 cm x 30 cm y 30 cm de profundidad luego de la cosecha de las plantas. Para el ensayo de macetas se colectó el contenido total de suelo de cada maceta. Se homogeneizó cada muestra, se realizó digestión ácida, y se analizaron los metales de igual forma que para los tejidos vegetales.

Resultados

1. El crecimiento y la producción de biomasa de las plantas de cáñamo no se vio afectado por la presencia de metales en el suelo del cultivo

Las plantas de cáñamo cultivadas en bancales (ensayo 1) con suelo contaminado presentaron valores de parámetros de crecimiento similares a las plantas crecidas en suelo limpio, ya que no se observaron diferencias significativas en la altura, el número de nudos, la longitud del entrenudo central, el nivel de clorofila, ni la producción de biomasa de tallo medida en peso fresco y seco (Figura 2). Estos resultados fueron consistentes con el ensayo en macetas (ensayo 2), en los cuales tampoco se encontraron diferencias significativas entre los parámetros de crecimiento de las plantas creciendo en suelo contaminado versus limpio. Los valores promedio de altura de las plantas en suelo contaminado y limpio fueron $337,5 \pm 27,8$ cm y $331 \pm 26,06$ cm, respectivamente. El diámetro del tallo fue de $10,81 \pm 1,19$ mm y de $11,13 \pm 0,64$ mm para las plantas de suelo contaminado versus suelo limpio, y la longitud del entrenudo central de $7,25 \pm 1,03$ cm y $7,64 \pm 1,7$ cm, respectivamente. La biomasa del tallo medida como PF y PS tampoco presentó diferencias significativas entre los tratamientos, siendo los valores de PF de $212,5 \pm 72,5$ g y $217,1 \pm 44,99$ g entre suelo contaminado y limpio y para el PS de $82,55 \pm 28,36$ g y $83,9 \pm 15,63$ g, respectivamente. Por último, el nivel de clorofila de las plantas creciendo en suelo contaminado fue de $44,52 \pm 5,56$, similar al de las plantas creciendo en suelo limpio, $41,97 \pm 5,438$.

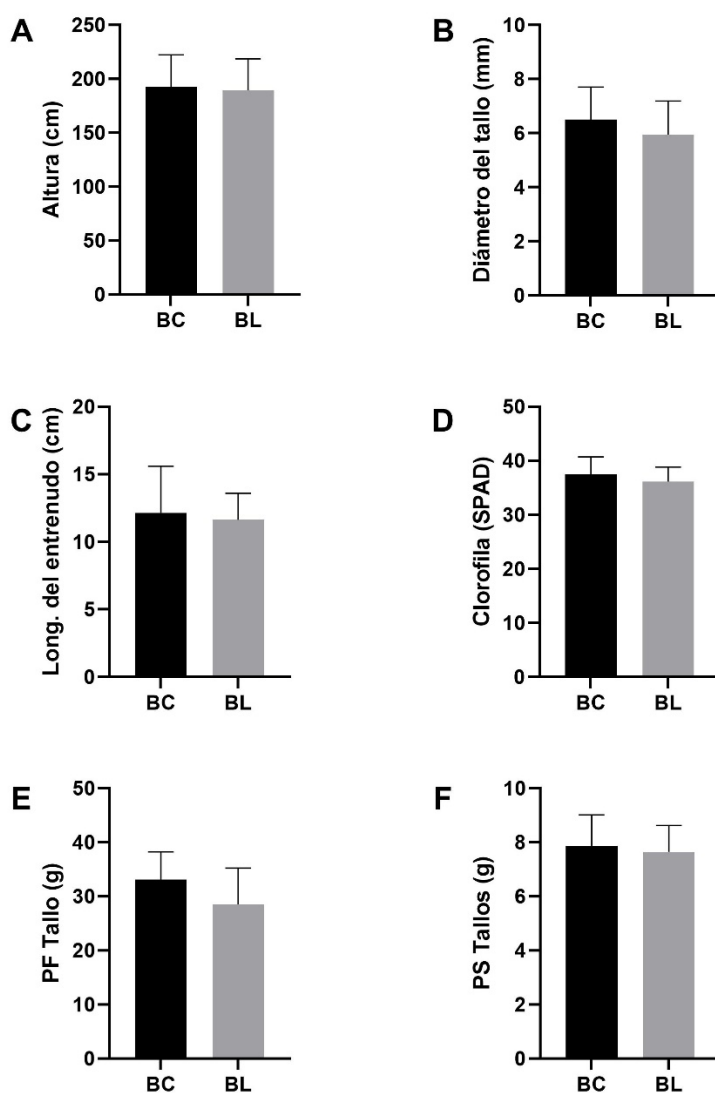


Figura 2. Parámetros de crecimiento y biomasa del tallo medida en peso fresco (PF) y peso seco (PS) analizados en plantas de cáñamo cultivadas en suelo contaminado (BC) o suelo limpio (BL). Los datos corresponden al ensayo 1 en bancales.

2. Las plantas de cáñamo presentaron acumulación de metales en raíces y traslocación a hojas

El cultivo de cáñamo tuvo un efecto significativo en la reducción de cromo del suelo, lo que se correlacionó con una acumulación del mismo en raíces y en hojas (Figura 3B y D). El cultivo de cáñamo también acumuló plomo en raíces y hojas, sin embargo, esto no se vio reflejado en un descenso de la concentración de este metal en el suelo (Figura 3C y D). Con respecto al cadmio, su presencia en el sustrato fue 100 veces menor que la de cromo y plomo y se observó muy poca acumulación, concentrada en las raíces, sin traslocación a la parte aérea. En este caso, tampoco se observaron cambios significativos

de este metal en el suelo luego del cultivo (Figura 3A y D). La presencia de los tres metales en el tallo de las plantas fue despreciable.

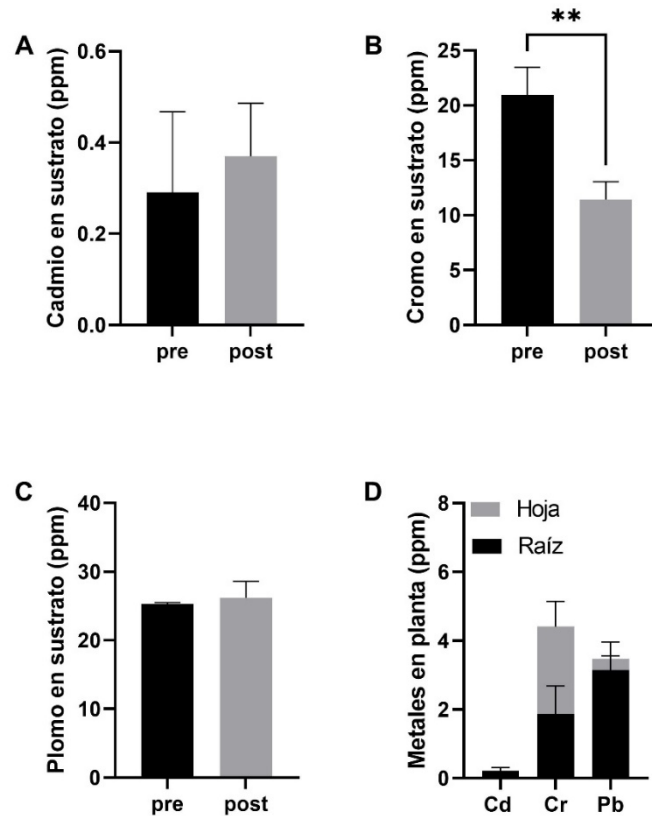


Figura 3. Concentración de metales en el suelo al inicio (pre) y al final (post) del cultivo de cáñamo (A, B y C) y en las hojas y raíces de las plantas (D). Los valores se expresan en ppm y corresponden al ensayo 1 en bancales. ** Diferencias estadísticamente significativas, $p < 0.005$.

El valor del Factor de Coeficiente de Bioacumulación (BCF), el cual estima el potencial de acumulación de metales, fue de 0,22 para los tres metales en conjunto. Específicamente para el cromo, el valor de BCF fue de 0,38. Dado que este valor de BCF es inferior a 1, no podemos decir que en este ensayo el cáñamo fue bioacumulador eficiente de cromo. Sin embargo, la concentración del metal en el sustrato disminuyó significativamente luego del cultivo. Además, como se mencionó anteriormente, se observó la presencia de este metal tanto en raíces como en hojas, siendo el valor del factor de traslocación (TF) de 1,36, lo que indica que el metal se está translocando a la parte aérea de forma eficiente. Esto es importante porque facilita la eliminación del metal al cosechar la parte aérea de la planta.

Para profundizar el estudio sobre la capacidad del cáñamo para la extracción de metales del suelo, se analizó su presencia en las plantas del ensayo 2 en macetas, extendiendo el tiempo de cosecha durante 106 días más que en el ensayo 1. La extensión del periodo de cultivo se realizó con el fin de promover una mayor acumulación de metales en las plantas. Como se muestra en la Figura 4, las plantas creciendo en macetas fueron capaces de acumular metales. Se observó una mayor concentración de cadmio, cromo y plomo en raíces con respecto al ensayo 1 (bancales) y en hojas solo para el plomo. La concentración total de metales en las raíces y hojas de las plantas cultivadas en macetas alcanzó los 14 ppm. En comparación, las plantas crecidas en bancales durante la mitad del tiempo, lograron acumular 8,06 ppm.

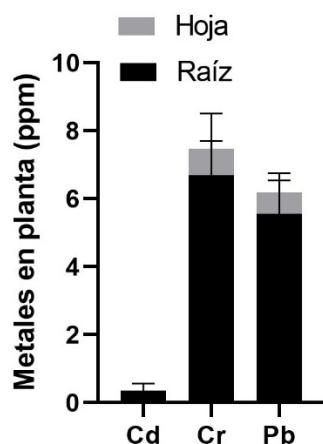


Figura 4. Concentración de metales en las hojas y raíces de las plantas de cáñamo. Los valores se expresan en ppm y corresponden al ensayo 2 en macetas.

Si bien las plantas acumularon metales en las hojas y raíces, no se pudo observar una disminución significativa en el suelo luego del cultivo en macetas. Esto mismo ocurrió para el cadmio y el plomo en el ensayo 1 en bancales. Debido a esto, el BCF para este ensayo también fue bajo, con un valor de 0,25, representando la concentración de metales acumulados en la planta en relación con la concentración de metales en el suelo luego del cultivo.

Al igual que en el ensayo 1, la presencia de metales en los tallos fue prácticamente despreciable, y como se mencionó anteriormente, las plantas demostraron una buena capacidad de crecimiento en suelos contaminados, sin diferencias significativas en longitud ni peso respecto de aquellas cultivadas en suelos limpios. Este resultado permitió

impulsar una nueva actividad de extensión junto a la comunidad, orientada a explorar el aprovechamiento de los tallos para la elaboración de ladrillos destinados a la bioconstrucción.

Discusión y conclusiones

Los resultados del presente estudio demostraron que el cáñamo puede desarrollarse en suelos contaminados con metales pesados sin afectar su crecimiento ni la producción de biomasa aérea, dado que no se observaron diferencias significativas en los parámetros de crecimiento entre los cultivos en suelo contaminado y en suelo limpio. Este hallazgo es clave para iniciativas de extensión universitaria, ya que permite plantear estrategias de recuperación ambiental que no compitan con la productividad ni con el uso sostenible del cultivo para fines comunitarios.

Asimismo, el cultivo mostró capacidad de acumulación y translocación de ciertos metales, especialmente cromo, desde el suelo hacia los tejidos vegetales. El hecho de que la concentración de metales en suelo no mostró una disminución significativa luego del cultivo, podría relacionarse con un aporte externo de los mismos, durante la fertilización y/o el riego. Dada la experiencia inicial en el cultivo de cáñamo en presencia de suelos contaminados con metales, por un lado, se disminuyó la concentración de contaminantes a la mitad utilizando suelo limpio y, por otro lado, se aplicaron fertilizantes utilizados en prácticas agrícolas convencionales, lo que pudo aportar metales al cultivo. Esto fue corroborado analíticamente, el fertilizante presentó $1,83 \pm 0,08$ ppm de cadmio y $21,78 \pm 0,03$ ppm de cromo, mientras que el agua de riego en una muestra tomada luego del ensayo presentó solo $0,003 \pm 0,0003$ ppm de cromo. Estos datos, además, dejan en evidencia que para el cultivo de cáñamo se deben tener consideraciones especiales a la hora de aplicar fertilizantes convencionales dada la capacidad de la planta de absorber eficientemente metales del suelo, sobre todo si el cultivo se utiliza con fines medicinales, cosméticos o alimenticios.

Aunque los valores del coeficiente de bioacumulación obtenidos fueron bajos, la disminución significativa de cromo en el suelo y su presencia en hojas evidencian el potencial del cáñamo como herramienta para su aprovechamiento en prácticas reales de remediación ambiental. La extensión del período de cultivo incrementó la acumulación de metales en raíces, lo que sugiere que el trabajo sostenido en territorio y la continuidad

de las intervenciones podrían potenciar aún más los procesos de fitorremediación. En esta línea, una estrategia prometedora para optimizar la extracción y movilidad de los metales en la planta es la incorporación de bacterias rizosféricas resistentes a metales pesados. Singh et al. (2023) demostraron que *C. sativa*, asociada a microorganismos con atributos PGPR (promotores del crecimiento vegetal), puede facilitar la fitoextracción o fitoestabilización en matrices altamente complejas, posicionando esta interacción como una tecnología verde con impacto concreto en la recuperación de sitios industriales contaminados.

Adicionalmente, será necesario profundizar en los mecanismos de traslocación hacia la parte aérea, especialmente en hojas, para mejorar la eficiencia en la remoción del metal mediante la cosecha. En el ensayo más prolongado, este proceso pudo verse subestimado debido a la caída de hojas senescentes, las cuales no pudieron ser analizadas. En conjunto, estos resultados abren nuevas líneas de investigación orientadas a optimizar el desempeño fitorremediador del cultivo y avanzar hacia implementaciones territoriales con mayor escala e impacto ambiental y social.

La implementación del primer invernadero de cáñamo dentro de la UNDAV permitió integrar la producción de conocimiento con una experiencia formativa innovadora y con fuerte participación comunitaria, incluyendo organizaciones sociales y cooperativas locales. Esta construcción colectiva transforma la investigación en una plataforma pedagógica que promueve aprendizajes interdisciplinarios, formación de estudiantes en problemáticas reales y legitimación social de la universidad pública en su rol como agente de transformación.

En términos de impacto social, este trabajo se inscribe en un territorio afectado por la contaminación industrial, como es la Cuenca Matanza-Riachuelo, donde la degradación del ambiente está directamente vinculada con las condiciones de vida de miles de habitantes. Frente a esta realidad, la propuesta de fitorremediación mediante cáñamo constituye una intervención concreta y situada, que acerca a la universidad al abordaje de problemáticas urgentes e históricas, convergiendo con lineamientos del Plan Integral de Saneamiento Ambiental y fortaleciendo la articulación con organismos públicos como ACUMAR.

Asimismo, el proyecto fortaleció el trabajo colaborativo con organismos y organizaciones del territorio como la Cooperativa LARA y el colectivo IDEAL

Avellaneda, promoviendo procesos de coestión del conocimiento y favoreciendo el diálogo entre saberes, tal como plantea el principio de integralidad universitaria.

La interacción con estos actores contribuyó a visibilizar la problemática de contaminación en la cuenca, así como las posibilidades reales de intervención sustentable mediante tecnologías verdes, accesibles y socialmente apropiadas.

Finalmente, el hallazgo de que los tallos no presentaron acumulación significativa de metales abre oportunidades para iniciativas productivas vinculadas a la bioeconomía local, como la elaboración de ladrillos para bioconstrucción, lo cual ya dio origen a una nueva línea de trabajo extensionista junto a la comunidad.

Este proyecto reafirma el rol de la universidad pública como agente de transformación social y ambiental. Contribuye a la construcción de conocimientos con impacto en la calidad de vida y al fortalecimiento de capacidades en el territorio. Además, demuestra que la fitorremediación con cáñamo es una alternativa científica viable que promueve la justicia ambiental y la participación comunitaria mediante soluciones sostenibles desde y con el territorio.

Referencias bibliográficas

- Ashraf S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., Asghar, H. N. (2019) Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol Environ Saf*, 174:714–727.
- Chabbert, B., Kurek, B., y Beherec, O. (2013). Physiology and botany of hemp. In P. Bouloc, S. Allegret, y L. Arnaud (Eds.), *Industrial hemp production and uses*, Pp. 27–47.
- Kramer, U. (2010). Metal hyperaccumulation in plants. *Annu Rev Plant Biol*, 61:517–534.
- Leizer, C., Ribnicky, D. M., Poulev, A., Dushenkov, D., y Raskin, I. (2000). The composition of hemp seed oil and its potential as an important source of nutrition. *Journal of Nutraceuticals, Functional y Medical Foods*, 2(4), 35–53.
- Ley N.º 21.671. (1977). Prohibición de cultivo, tenencia y comercialización de opio, marihuana y coca. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-21671-303786/texto>

- Ley N.º 27.350. (2017). Investigación médica y científica del uso medicinal de la planta de cannabis y sus derivados.
<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27350-273801/actualizacion>
- Ley N.º 27.669. (2022). Marco regulatorio para el desarrollo de la industria del cannabis medicinal y el cáñamo industrial.
<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27669-365303/texto>
- Linger, P., Müssig, J., Fischer, H., y Kobert, J. (2002). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fibre quality and phytoremediation potential. *Industrial Crops and Products*, 16(1), 33–42.
- Nedjimi, B. (2009). Calcium can protect *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* from cadmium toxicity. *Acta Bot Gallica*, 156(3):391–397.
- Nedjimi, B. (2021). Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *SN Applied Sciences*, 3(3), 286.
- Nedjimi, B., Daoud, Y. (2009). Ameliorative effect of CaCl_2 on growth, membrane permeability and nutrient uptake in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* grown at high (NaCl) salinity. *Desalination*, 249:163–166.
- Nissim, W. G., Palm, E., Mancuso, S., y Azzarello, E. (2018). Trace element phytoextraction from contaminated soil: A case study under Mediterranean climate. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 9114–9131.
- Pietrini, F., Passatore, L., Patti, V., Francocci, F., Giovannozzi, A., y Zacchini, M. (2019). Morpho-physiological and metal accumulation responses of hemp plants (*Cannabis sativa* L.) grown on soil from an agro-industrial contaminated area. *Water*, 11(4).
- Rheay, H. T., Omondi, E. C., y Brewer, C. E. (2021). Potential of hemp (*Cannabis sativa* L.) for paired phytoremediation and bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 13(4), 525-536.
- Shah V, Daverey A (2020) Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environ Technol Innov*, 18:100774.
- Singh, K., Tripathi, S., y Chandra, R. (2023). Bacterial assisted phytoremediation of heavy metals and organic pollutants by *Cannabis sativa* as accumulator plants

growing on distillery sludge for ecorestoration of polluted site. *Journal of environmental management*, 332, 117294.

Small, E. (2015). Evolution and classification of *Cannabis sativa* (Marijuana, Hemp) in relation to human utilization. *The Botanical Review*, 81(3), 189–294.

Stawski, M. y Osler, L. (2023). Estas plantas tan útiles a la humanidad. Un breve recorrido del ingreso del cáñamo al virreinato del Río de la Plata: del siglo XV a Manuel Belgrano. *Revista Eleusis*, Año 1, Núm.1, ISSN:2953-5360.

Tonelli, F.C.P., Tonelli, F.M.P., Lemos, M.S., de Melo Nunes, N.A. (2022). Mechanisms of phytoremediation. *Phytoremediation. Academic Press*, pp. 37–64.