

Instituto Tecnológico Superior de Abasolo

Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Guanajuato.



Biorremediación de suelo con presencia de cromo hexavalente mediante *Trichoderma yunnanense*

Tesis profesional que para obtener el título de:

Ingeniero Ambiental

Presenta:

Nataly Guadalupe Martínez Mora

Director de Tesis:

M. en E. Erick Rodolfo López Almanza

Codirector de Tesis:

Dra. Anabel Flores Lee

ABASOLO, GTO.

09/07/2025



Autorización de presentación de trabajo de titulación

Se autoriza al estudiante **Nataly Guadalupe Martínez Mora** inscrito en la carrera de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, con número de control **AS21110407**, a defender su proyecto de trabajo de titulación **Biorremediación de suelo con presencia de cromo hexavalente mediante *Trichoderma yunnanense*** ante el comité sinodal asignado.

La presente se expide en Abasolo Guanajuato a los 09 de Julio de 2025.

M. en E. Erick Rodolfo López Almanza

Presidente del sínodo

Dra. Anabel Flores Lee

Secretario del sínodo

Dra. Coraquetzali Magdaleno López

Vocal del sínodo

Dedicatorias

Dedico de manera muy especial a ti, mi amado Dios, fuente de amor y sabiduría. Gracias por sostenerme en cada paso, por darme fuerzas en los momentos de debilidad y por iluminar siempre mi camino cuando todo parecía oscuro, sin ti este sueño no habría sido posible.

A mí misma, por la perseverancia y la dedicación que me han llevado a alcanzar este logro, por las noches sin dormir, los días de estudio, los obstáculos vencidos y la pasión por aprender. Este logro es el resultado de mi esfuerzo y compromiso conmigo misma.

A mi abuelita, quien fue, es y será una madre para mí en toda la extensión de la palabra, por ser siempre un pilar de ternura, por siempre creer en mí y apoyarme en los momentos más difíciles.

A mi madre, cuyo amor, sacrificio y constancia me guiaron en cada uno de mis pasos recorridos, quien a pesar de todo lo vivido nunca se rindió para ayudarme a llegar hasta aquí.

A mi hermano, por ser un ejemplo de perseverancia y por su apoyo incondicional, por ser mi ejemplo para seguir y por regalarme el más lindo tesoro, mi sobrina.

Y a la memoria de mi abuelito, quien fue mi figura paterna en todos los sentidos, su presencia vivirá por siempre en mi corazón, su ejemplo y enseñanzas siguen iluminando mi camino.

Esta meta alcanzada no es solo mía, es también de ustedes.

Nataly Guadalupe Martinez Mora

Agradecimientos

Este espacio es para agradecer de manera muy especial al M. en E. Erick Rodolfo López Almanza, por aceptar ser mi director, por confiar este proyecto en mis manos y por invertir su tiempo en apoyarme y transmitirme sus conocimientos.

Agradezco a mi codirectora, la Dra. Anabel Flores Lee, por ayudarme a que este proyecto fuera realidad, por compartir conmigo sus conocimientos y estar siempre al pendiente de mis dudas.

Le agradezco a la Dra. Coraquetzali Magdaleno López, por brindarme un espacio de su tiempo para formar parte del cuerpo sinodal y ser testigo de este día tan importante.

Agradezco al Tec. Fernando Romero Vargas, encargado de los laboratorios de la ITESA, por apoyarme en la parte experimental de mi proyecto, por resolver mis dudas de la manera más amable y profesional.

Le agradezco a mis amigas Daniela Vargas, Fabiola Granados, Odalys García y Maya Rosas, y a mi amigo Fabian Meza, porque siempre estuvieron para mí, me brindaron su apoyo y su amistad incondicional cuando más lo necesite, por sacarme una sonrisa en mis momentos más tristes, siempre los voy a llevar en mi corazón.

Agradezco a cada uno de mis maestros, quienes fueron pieza fundamental en mi formación como profesionista, por compartirme sus conocimientos, por siempre brindarme su ayuda y por siempre hacerme ver que en ellos podía encontrar un amigo.

Le agradezco a mi hermana Elizabeth Martinez y a mi mejor amiga Ana Carrillo, por estar siempre conmigo, por brindarme su apoyo emocional y por creer en mí en todo momento incluso cuando ni yo misma lo hacía.

A su vez agradezco a Hugo Araiza, una persona muy importante para mí, por su paciencia y apoyo durante este proceso, gracias por creer en mí y por estar siempre cuando lo he necesitado, su comprensión y motivación han sido fundamentales para llegar a la meta

Resumen

El objetivo principal de este proyecto de investigación consistió en identificar qué tipo de cepa *Trichoderma yunnanense* (Testigo, T2R4, T3R1, T1) cuenta con la capacidad de reducir la concentración de cromo hexavalente proveniente de las descargas de aguas residuales generadas de las industrias del curtido de la ciudad de León, Guanajuato, para realizar esto se evaluó el procedimiento de micorremediación, por lo que fue necesario realizar un muestreo de suelo en presa “La Alberca” del municipio de Cuerámara, Guanajuato. Se tomó este punto de referencia tomando en cuenta su relevancia respecto a que la presa recibe agua del Río Turbio, el cual atraviesa la ciudad de León y este a su vez recibe las descargas de agua mencionadas anteriormente.

Para llevar a cabo este análisis se tomó como referencia la NMX-AA-132-SCFI-2016; se consideraron cuatro puntos representativos del terreno donde se tomaron 60 muestras simples para generar una muestra compuesta por el método de cuarteo. La muestra de suelo fue utilizada para formar 12 muestras de 1 kg las cuales fueron utilizadas para la inoculación con la cepa, la muestra de suelo restante se utilizó para realizar una caracterización del suelo. Para la determinación de Cr (VI) se generó una curva de calibración donde se tomaron como referencia 6 concentraciones diferentes (0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.6, 0.75 mg/L) en base a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Las cepas fueron sembradas en sustrato (Arroz) para su crecimiento y con ellas se generaron 4 soluciones. La micorremediación se realizó inoculando las muestras de suelo en peceras de vidrio, las cuales fueron regadas con las soluciones durante un mes. Se determinó que la cepa T2R4 es la más apta para la remoción de Cr (VI), en donde a una concentración de 0.4292 mg/L hubo una remoción del 91.94 % de este metal.

Palabras Clave: Cromo hexavalente, *Trichoderma yunnanense*, micorremediación, curtiduría, suelo.

Abstract

The main objective of this research project was to identify which strain of *Trichoderma yunnanense* (Control, T2R4, T3R1, T1) could reduce the concentration of hexavalent chromium from wastewater discharges generated by the tanning industries in the city of León, Guanajuato. To achieve this, the mycoremediation process was evaluated, which required soil sampling at the "La Alberca" dam located in the municipality of Cuerámara, Guanajuato. This location was selected due to its relevance, as the dam receives water from the Turbio River, which flows through León and carries the aforementioned wastewater discharges.

To conduct this analysis, the NMX-AA-132-SCFI-2016 standard was used as a reference. Four representative points of the area were considered, from which 60 simple samples were collected to generate a composite sample using the quartering method. The soil sample was used to create twelve 1 kg samples for inoculation with the strain, and the remaining soil was used to perform a soil characterization. For the determination of Cr (VI), a calibration curve was created using six different reference concentrations (0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.6, 0.75 mg/L), based on NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

The strains were cultivated on a rice substrate to allow for growth, and four solutions were prepared with them. Mycoremediation was carried out by inoculating the soil samples in glass tanks, which were irrigated with the solutions over the course of a month. It was determined that the T2R4 strain was the most effective for Cr (VI) removal, achieving a 91.94% reduction at a concentration of 0.4292 mg/L.

Key Words: Hexavalent chromium, *Trichoderma yunnanense*, Mycoremediation, Tannery, Soil.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: MARCO TEÓRICO	3
1.1 Metales pesados	4
1.1.1 Efectos de los metales pesados en la salud humana	4
1.1.2 Efectos de los metales pesados en el medio ambiente	5
1.2 Sectores industriales que son fuente de contaminación de metales pesados	6
1.2.1 Industria del curtido de pieles	7
1.3 Cromo hexavalente	9
1.4 Características físicas del suelo	10
1.5 Técnicas de remoción de cromo hexavalente	11
1.5.1 Remediación de suelos	12
1.5.2 Biorremediación de suelos	13
1.5.3 Micorremediación	14
1.5.4 <i>Trichoderma</i>	15
1.6 Zona de estudio	17
Capítulo 2: GENERALIDADES DEL PROYECTO	19
2.1 Planteamiento del problema	20
2.2 Justificación	22
2.3 Hipótesis	23
2.4 Objetivos	23
2.4.1 Objetivo general	23
2.4.2 Objetivos específicos	23
Capítulo 3: METODOLOGÍA	25

3.1 Muestreo del terreno.....	26
3.1.1 Ubicación del terreno y muestreo	26
3.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos del suelo	28
3.2.1 Textura del suelo	28
3.2.2 Determinación de pH	29
3.2.3 Determinación de Nitrógeno	31
3.2.4 Determinación de Fósforo.....	33
3.2.5 Determinación de Potasio.....	34
3.2.6 Determinación de humedad.....	36
3.3 Medición colorimétrica para la presencia de cromo hexavalente.....	37
3.4 Digestión alcalina para cromo hexavalente	39
3.5 Cultivo de la cepa <i>Trichoderma</i>	43
3.6 Inoculación del suelo con la cepa	45
Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1. Obtención de la muestra de suelo	49
4.2. Análisis fisicoquímicos.....	50
4.3. Medición colorimétrica y curva de calibración	52
4.4. Determinación de Cr (VI).....	53
4.5. Crecimiento de la cepa.....	54
4.6. Obtención de la solución de la cepa.....	54
4.6.1 Eficiencia de la cepa.....	55
CONCLUSIÓN	60
Bibliografía	63

Índice de tablas

Tabla 4.1 -	Coordenadas de los puntos de muestreo	49
Tabla 4.2 -	Caracterización y fertilidad del suelo.	50
Tabla 4.3 -	Absorbancia obtenida de cada dilución.	52
Tabla 4.4-	Absorbancia y concentración de Cr (VI).	53
Tabla 4.5-	Absorbancia y concentración obtenida del riego de dos semanas con las cepas.	55
Tabla 4.6-	Absorbancia y concentración obtenida del riego de un mes con las cepas.....	56
Tabla 4.7-	Absorbancia, concentración inicial y final del Cr (VI).	57

Índice de figuras

Figura 1.1. Mapa de la presa “La Alberca”	18
Figura 3.1. Barrena para suelos estándar AMS acero inoxidable.....	27
Figura 3.2. Recolección de la muestra	27
Figura 3.3. Volumen de sedimentación	29
Figura 3.4. Método colorimétrico de pH.....	31
Figura 3.5. Método colorimétrico de Nitrógeno.....	32
Figura 3.6. Método colorimétrico de Fósforo.	34
Figura 3.7. Método colorimétrico de Potasio	35
Figura 3.8. Peso de la capsula con la muestra húmeda.....	37
Figura 3.9. Desarrollo de color de las muestras estándar	39
Figura 3.10. Calentamiento de la muestra con agitación continua	42
Figura 3.11. Inoculación del sustrato con el hongo	45
Figura 3.12. Inoculación de las muestras de suelo con el hongo	47
Figura 4.1. Imagen satelital de los puntos de muestreo	49
Figura 4.2. Muestra simple extraída de uno de los puntos de muestreo	50
Figura 4.3. Triangulo de textura de la muestra de suelo	51
Figura 4.4. Curva de calibración.....	53
Figura 4.5. Crecimiento de la cepa en el sustrato	54
Figura 4.6. Obtención de las 4 soluciones de las cepas.....	54
Figura 4.7. Concentración de Cr (VI) restante	58
Figura 4.8. Porcentaje de Cr (VI) eliminado por las cepas	59

INTRODUCCIÓN

La principal fuente de contaminación del suelo por cromo hexavalente es la industria, en particular la industria del curtido, esto se debe a que durante este proceso se utilizan grandes cantidades de sales de cromo para dar mayor firmeza a la piel, los residuos generados por estas sales no reciben ningún tratamiento por lo que al final del día terminan apareciendo en el medio ambiente causando un daño significativo al suelo.

La micorremediación es una técnica factible en la remoción de Cr (VI), la cual es reconocida por ser amigable con el medio ambiente al momento de llevar a cabo una biorremediación, esto debido a que la micorremediación utiliza microorganismos como los hongos para remover metales pesados. Algunos de estos hongos como *Trichoderma yunnanense*, son reconocidos por resistir altas concentraciones de metales pesados como lo es el cromo (VI), estas son capaces de inmovilizar este metal y quitar la toxicidad de su ion transformándolo así en su forma menos toxica que es cromo trivalente.

En el capítulo I se muestran los temas de interés abordados, por ejemplo, algunos antecedentes que existen acerca de la presencia de cromo en el sitio de estudio seleccionado, así como también el impacto que generan las industrias del curtido en el suelo y la importancia de utilizar técnicas amigables con el medio ambiente como la micorremediación en el lugar de otras técnicas físicas o químicas que pueden llegar a generar repercusiones en el proceso.

En el capítulo II se muestra el planteamiento del problema del proyecto, el cual hace mención a la ciudad de León que es donde se encuentran la mayor parte de las curtidoras de pieles del estado, dichas industrias generan aguas residuales las cuales son descargadas de forma clandestina al río Turbio, el cual atraviesa varios municipios de Guanajuato, entre los que destaca Cuerámara, en donde se encuentra la presa “La Alberca”, estas aguas residuales son las causantes de la contaminación de suelo de dicho sitio que es el tema que nos interesa abordar. En este capítulo también se presenta la justificación, la cual menciona la importancia

de utilizar hongos para llevar a cabo la biorremediación de suelo contaminado con Cr (VI).

En el capítulo III se presenta el método para realizar el muestreo del sitio seleccionado, las diluciones para determinar la colorimetría con las que se obtuvieron las absorbancias para la curva de calibración, también se puede observar en ese mismo apartado como se determinó la caracterización física del suelo muestreado, el procedimiento que se siguió para determinar la concentración de Cr (VI) presente en presa “La Alberca”, así como la siembra de las cepas (Testigo, T2R4, T3R1, T1) y la técnica de micorremediación para determinar cuál de estas cepas es más apta para llevar a cabo la remoción de Cr (VI) en el suelo.

Por último, en el capítulo IV se muestran a través de tablas los resultados de la caracterización del suelo para llevar a cabo este proyecto, así como la presentación de graficas que representan el porcentaje de cromo removido por las cepas y la concentración restante en cada categoría, esto con el fin de determinar cuál de las cuatro cepas fue la más apta para este proceso.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Metales pesados

Los metales pesados son considerados elementos metálicos catalogados como agentes tóxicos y llegan a adquirir una alta densidad la cual es mayor a la del agua, también estos metales adquieren una gravedad específica o peso atómico por encima de los 20 g/mol. Algunos metales como el arsénico, cadmio, cromo y mercurio son considerados metales más densos e incluso altamente tóxicos, sin embargo, estos también son necesarios para los seres humanos u otros organismos siempre y cuando se encuentren dentro de los rangos máximos permisibles (Bravo y Quispe, 2019).

Ciertos elementos químicos con alta densidad (mayores a 4 g/cm³) así como masa y peso atómico por encima de 20 g/mol, llegan a ser tóxicos incluso en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son: aluminio (Al), mercurio (Hg), arsénico (As), plata (Ag), cromo (Cr), por mencionar algunos. En general se considera que los metales son perjudiciales, aunque en diversos casos algunos como el hierro, zinc y cobre resultan ser esenciales para el ser humano en la dieta sin embargo se debe tener un consumo responsable de estos debido a que su deficiencia o exceso pueden llegar a generar graves problemas en la salud (Franco *et al.*, 2016).

1.1.1 Efectos de los metales pesados en la salud humana

La presencia de metales pesados como el plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo, entre otros, en el ambiente puede causar problemas graves de salud. Por ejemplo, actualmente se considera que en los huesos de las personas existe alrededor de 400 a 1,000 veces más plomo que hace 400 años este factor se debe a la presencia de este metal en alimentos y productos industriales. El plomo causa diversos daños en el organismo uno de estos es el cerebro afectando así el desarrollo y la capacidad mental de los niños. Aunque ciertos metales son necesarios en pequeñas cantidades para funciones biológicas, un exceso o deficiencia de estos puede causar desequilibrios en el organismo (Franco *et al.*, 2016).

Además de los problemas mencionados anteriormente, elevadas concentraciones de metales pesados ingeridos en el organismo pueden llegar a ocasionar: erupciones cutáneas, malestar estomacal (úlceras), problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, hipertensión, alteración del material genético, cáncer, alteraciones neurológicas e incluso la muerte (Tamargo, 2022).

1.1.2 Efectos de los metales pesados en el medio ambiente

De acuerdo con Tejada-Tovar (2015), en la actualidad se enfrenta una gran preocupación respecto al aumento del índice de contaminación de efluentes industriales causada por la presencia de metales pesados tales como el cromo, níquel, cadmio, plomo y mercurio. Estas sustancias permanecen de manera indefinida en el medio ambiente poniendo en riesgo el bienestar y el equilibrio de la flora y fauna de nuestros ecosistemas.

Algunos efectos en las plantas causados por estos contaminantes se encuentra la necrosis en las puntas de las hojas, la inhibición del crecimiento de las raíces y en el peor de los casos la muerte total de la planta. Datos generados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecen que la concentración de metales pesados permitida en el agua se encuentra en un rango de 0.01-1 mg/L, lamentablemente en la actualidad los efluentes se encuentran con concentraciones altas de hasta 450 mg/L.

Información proporcionada por Gélvez (2015), indica que la presencia de cantidades altas de metales pesados en la fauna silvestre es motivo de preocupación, incluso en áreas remotas con poca actividad humana. Los jóvenes de diferentes especies de crustáceos y peces, en sus etapas embrionarias, larvales o juveniles, son especialmente susceptibles a estos metales. Cuando los metales son liberados en sistemas acuáticos, son rápidamente absorbidos por el plancton y se adhieren a la materia en suspensión, la cual eventualmente se deposita en los sedimentos.

Si hay cambios en las condiciones físicas o químicas, estos metales pueden ser movilizados y transferidos a través de las cadenas alimenticias hacia los peces. En

los animales marinos, altas concentraciones de metales pesados pueden provocar problemas como la asfixia debido a la coagulación de mucosas en las branquias o el hígado. Las aves que se alimentan de peces contaminados o que viven en áreas cercanas a fuentes de contaminación por metales pesados pueden verse afectadas. Los efectos pueden incluir daños en el sistema nervioso, problemas en la reproducción y reducción de la capacidad para volar y alimentarse.

Los metales pesados pueden afectar a los animales domésticos de manera similar a como lo hacen con otros mamíferos terrestres. Esto significa que, cuando los animales domésticos están expuestos a metales pesados en alimentos o efluentes, pueden experimentar desde síntomas agudos como vómitos y letargo hasta problemas crónicos en órganos importantes como el hígado y los riñones. Además, estos metales pueden acumularse en los tejidos del cuerpo con el tiempo, causando daños más graves. La reproducción también puede verse afectada, y los animales pueden volverse más propensos a enfermedades debido a una supresión del sistema inmunológico (Cahuana y Aduvire, 2019).

El impacto ambiental que generan estas sustancias tóxicas ha contribuido a que los científicos desarrollen diversos métodos para tratar la eliminación de estos metales presentes en los efluentes industriales, entre algunos de estos métodos se encuentran: precipitación, oxidación-reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana y recuperación por evaporación. Desafortunadamente hasta la fecha estos métodos han resultado ser muy costosos e incluso ineficientes (Pabón *et al.*, 2021).

1.2 Sectores industriales que son fuente de contaminación de metales pesados

Aunque la mayoría de los metales pesados forman parte naturalmente de la corteza terrestre, el ser humano ha contribuido a que las cantidades de estos sea mayor actualmente a la que se encontraba antes de manera natural, esto debido a la gran cantidad de procesos antropogénicos que se conciben manera irresponsable liberando estos contaminantes. La incineración de residuos también cuenta como

una fuente de contaminación que genera gran cantidad de metales tóxicos los cuales son causantes de gran variedad de problemas ambientales en el aire, agua y suelo (Rodríguez, 2017).

Dentro de las principales industrias que contribuyen a la generación de contaminación de metales pesados están: la minería, industria del cemento, colorantes, curtiduría, galvanoplastia, producción de acero, material fotográfico, pinturas corrosivas, producción de energía, fabricación de textiles, conservación de la madera, anodizado de aluminio, refrigeración por agua, entre muchas más, por mencionar algunas (Reyes, *et al.*, 2016).

1.2.1 Industria del curtido de pieles

La industria del curtido se encarga del procesamiento de pieles, generalmente de ganado, para transformarlas en cuero. Este material se utiliza en diversos productos como calzado, tapicería y ropa, entre otros. Esta industria es muy demandante a nivel global y ha crecido especialmente en Europa y Estados Unidos desde el siglo XX. Esto se debe a la intensa industrialización del cuero, que es requerido en numerosas áreas comerciales, principalmente en el sector de la moda (Silva y Morales, 2022).

El proceso desde la obtención de un producto hasta su venta implica varias etapas. Primero, se debe adquirir la piel en bruto, que generalmente proviene directamente de los animales. Al tratarse de un subproducto de la carne, la compra de estas pieles puede estar sujeta a restricciones y debe cumplir con normas de salubridad para garantizar que no representen un riesgo para la salud. Luego, se lleva a cabo el proceso de curtido, que incluye diversos tratamientos químicos y lavados para finalizar el material, ajustando su textura, color y calidad. Este proceso es esencial para fabricar productos como calzado, tapicería y prendas de vestir. Finalmente, el producto terminado está listo para ser vendido en sus distintas formas (Ricaurte y Núñez, 2016).

El curtido de pieles puede realizarse mediante dos métodos convencionales. El primero utiliza sales de cromo y es el más común, empleado por el 80% de la

industria, aunque es conocido por ser el más contaminante. El segundo método emplea agentes vegetales que cumplen una función similar, aunque con menor eficacia y mayor tiempo de procesamiento, siendo una opción más ecológica y menos perjudicial para el medio ambiente (Silva y Morales, 2022).

De acuerdo con Álvaro (2017), el uso del cromo como agente de curtido se debe a la excelente calidad del cuero que se produce. Las sales de cromo permiten un curtido más uniforme y rápido, y además, proporcionan una mayor extensión del material haciéndolo más resistente a altas temperaturas. La industria tiene un gran impacto debido a las características de los efluentes que libera de estos procesos.

En el estado de Guanajuato se realiza el 76.4% del curtido y acabado de piel en México, destacando los municipios de León, San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón. A nivel nacional, hay más de 900 tenerías, y más del 90% de ellas se encuentran en Guanajuato. Estas industrias suelen generar descargas de aguas residuales que llegan a cuerpos de aguas como ríos y arroyos (Bernal, 2014).

El río Turbio es uno de los ríos más contaminados en el Estado de Guanajuato, reflejando el impacto negativo de esta actividad industrial, especialmente las empresas que no están reguladas de la ciudad de León, que vierte sus aguas residuales sin el debido control ambiental. Durante más de 18 años, los municipios por los que pasa el río han establecido acciones para intentar limpiar el cauce, pero no han logrado resultados significativos. Los residentes a lo largo del río deben soportar la contaminación y los olores desagradables que sus aguas generan, especialmente en la temporada de calor.

En 2005, un estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM] realizado por el Instituto de Geología, titulado 'Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el río Lerma, estado de Guanajuato, México' (Hernández-Silva *et al.*, 2005), confirmó la presencia de metales pesados en el río Turbio, revelando que sus niveles superan tanto los límites nacionales como los estándares internacionales. El análisis

identificó la presencia de arsénico, cadmio, cobalto, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, níquel y zinc en el agua del río (Arriaga, 2023).

Bautista (2017), indica que la mayoría de los metales pesados de origen humano que han contaminado el río Turbio han comenzado a ingresar desde la década de 1950, cuando se empezó a industrializar León, San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos. Además, las 79 comunidades, con poblaciones de entre mil y dos mil quinientos habitantes, ubicadas a lo largo del río también contribuyen a la contaminación al verter sus aguas residuales en él. Los municipios atravesados por el río Turbio son Abasolo, Cuerámaro, Manuel Doblado, León, Pénjamo, Purísima del Rincón y Romita.

De acuerdo con Bermúdez y López (2017), se estableció a través de análisis colorimétricos que en la presa “La Alberca”, situada en la comunidad de Tres Villas, Cuerámaro, Guanajuato, se detectó la presencia de Cr (VI) en una concentración de 1.496 mg/L, rebasando esta los límites máximos permisibles, esto debido a que la NOM-001-SEMARNAT-2021, establece que el límite máximo permisible de metales pesados como el Cr, es de 1 mg/L (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2022). Esta presa recibe agua del Río Turbio, el cual a su vez recibe descargas de aguas residuales provenientes de las industrias del curtido ubicadas en la ciudad de León.

Este tipo de industrias están catalogadas como las principales causantes de la contaminación de cromo hexavalente.

1.3 Cromo hexavalente

El cromo hexavalente es un metal altamente tóxico y es considerado como uno de los contaminantes de mayor impacto ambiental. El cromo puede presentarse en tres estados diferentes de oxidación: +2, +3 y +6, siendo este último valor su forma más toxica. Cuando el cromo está en su estado de oxidación +6, se le conoce como cromo hexavalente o cromo (VI), este estado es considerado tóxico y carcinógeno por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU (EPA). Los compuestos más comunes de cromo hexavalente son los cromatos ($\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$) y dicromatos ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$).

Por otro lado, el cromo en su estado de oxidación +3 es más comúnmente encontrado y conocido como cromo trivalente o cromo III y en este estado resulta ser esencial como oligoelemento para los seres humanos (Morales, 2022).

El cromo hexavalente puede liberarse al medio ambiente a través de diversas actividades industriales y procesos, como la fabricación de productos químicos, la producción de cromo y sus compuestos, el curtido de cuero, la fabricación de pigmentos, la galvanoplastia, Por mencionar algunos. Durante estas actividades, el cromo hexavalente puede ser liberado en forma de gases, vapores o partículas sólidas, que luego pueden contaminar el aire, el agua y el suelo. Además, el cromo hexavalente también puede ser liberado como resultado de la combustión de materiales que contienen cromo, como los combustibles fósiles y la madera tratada con productos químicos que contienen cromo, como los son el dicromato de sodio o el dicromato de potasio (Barrera, 2017).

Los límites máximos permisibles marcados por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la cual establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación, indican que para suelos industriales la concentración de referencia total (Cfr) de cromo hexavalente es de 510 mg/kg (Ardavin y García, 2016).

1.4 Características físicas del suelo

El suelo es la capa más superficial de la corteza de la Tierra, así como la interfase entre la litósfera y atmósfera, transformándose así en uno de los más importantes elementos de todo el ecosistema y también como el más básico de los recursos naturales (Tenorio *et al.*, 2014).

De acuerdo con Cabrera *et al.* (2014) mencionan que el estado físico del suelo se encuentra ligado a la fertilidad, así como también que es el resultado de la interacción de las fases líquidas y sólidas del suelo. Sin embargo, actualmente dieron una idea más clara acerca de este concepto donde se define que el estado

físico del suelo resulta de la interacción de los componentes mineral, orgánico, líquido, gaseoso y biológico del suelo.

Dentro de las características que conforman el suelo se encuentran los microelementos y macroelementos, los microelementos son sustancias esenciales para las plantas que se encuentran en el suelo en pequeñas cantidades. Entre ellos se encuentran el hierro (Fe), el cobre (Cu), el zinc (Zn), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo) y el boro (B). Por otro lado, los macroelementos son nutrientes que las plantas absorben y que están presentes en el suelo en grandes cantidades. Este grupo incluye el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Estos elementos se dividen en dos categorías según la frecuencia con la que se aplican a los cultivos: los macroelementos primarios (N, P y K) y los macroelementos secundarios (S, Ca y Mg) (Quero-Jiménez *et al.*, 2019).

1.5 Técnicas de remoción de cromo hexavalente

Se han creado diversas tecnologías físicas y químicas para eliminar la contaminación del entorno y reducir los niveles de Cr (VI) a los límites aceptados por las leyes ambientales actuales. Estas técnicas se basan en las características físico-químicas de los metales y del ambiente afectado para cambiar, atrapar o separar los metales. Hoy en día, los métodos físico-químicos más comunes para eliminar los iones de Cr (VI) se centran en reducir el contaminante a iones de Cr (III), que son menos tóxicos y solubles. Luego, se separan mediante una precipitación química (Pochteca Perú, 2025)

Algunos de estos métodos incluyen la estabilización físico-química, la extracción con ácido clorhídrico, el lavado del suelo con agentes extractantes, la adición de sustancias orgánicas e inorgánicas al suelo contaminado y la desorción térmica a temperaturas entre 320 y 560 °C. Estas técnicas son eficaces para eliminar la contaminación, pero en ocasiones generan subproductos que podrían ser más peligrosos que el contaminante inicial. Además, debido a su mayor costo, las empresas que buscan cumplir con las regulaciones ambientales pueden no poder pagarlos y optan por no usarlos (Romero *et al.*, 2023).

Con base en la investigación realizada por Zúñiga *et al.* (2022), se han implementado otras técnicas para la remoción de cromo hexavalente en suelo, entre estas se encuentra la electroremediación, bioestimulación y la combinación de estas dos técnicas (electrobioestimulación).

La electroremediación, también conocida como electrocinética o remediación electroquímica, es una técnica que consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad entre un par de electrodos insertados en el suelo a tratar. Este proceso favorece el movimiento de agua, iones y partículas cargadas tanto positiva como negativamente. Los aniones se desplazan hacia el electrodo positivo (cátodo), mientras que los cationes se dirigen hacia el electrodo negativo (ánodo). Esta técnica es particularmente útil para la remediación de suelos con baja permeabilidad hidráulica, los cuales son difíciles de tratar mediante otros métodos de descontaminación. Además, es especialmente efectiva para tratar metales solubles o aquellos presentes en el suelo en forma de complejos como óxidos, hidróxidos y carbonatos.

La bioestimulación es un proceso que implica modificar las condiciones del suelo mediante la adición de nutrientes, sustratos o aditivos, con el objetivo de fomentar el crecimiento y desarrollo de los microorganismos nativos que poseen la capacidad de biodegradar, eliminar, reducir o transformar los contaminantes presentes en el suelo. Una de las principales ventajas de las técnicas biológicas es que pueden combinarse con otros métodos, lo que mejora su implementación y la efectividad del tratamiento (Agrícolas, 2024).

En otras ocasiones también se opta por utilizar técnicas de remediación para remover cromo de suelos contaminados por este metal.

1.5.1 Remediación de suelos

La remediación de suelos es un conjunto de procesos y técnicas utilizadas para limpiar o restaurar suelos que han sido contaminados por sustancias nocivas, como productos químicos, metales pesados, o residuos industriales. El objetivo es eliminar, reducir o transformar estos contaminantes para que el suelo vuelva a ser

seguro y saludable para el medio ambiente y para el ser humano. Existen diferentes métodos de remediación, que pueden ser físicos, químicos o biológicos, y la elección de uno u otro depende del tipo de contaminante, las características del suelo y el nivel de contaminación (Sepúlveda *et al.*, 2019).

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales no pueden descomponerse por vía biológica, física o química, de manera que la remediación de suelos contaminados con metales pesados se limita al confinamiento de estos residuos o a la alteración de su solubilidad, movilidad y/o toxicidad a través de cambios en su estado de valencia, lo que favorece su inmovilización (quelación) y/o movilización (disolución).

Las técnicas para la remediación de suelos se basan en métodos fisicoquímicos y biológicos; estas últimas llamadas biorremediación, ya que aprovecha el potencial metabólico de organismos vivos (bacterias y hongos) para la descontaminación (Covarrubias *et al.*, 2015).

1.5.2 Biorremediación de suelos

La biorremediación de suelos es un proceso que utiliza organismos vivos, como bacterias, hongos o plantas, para limpiar o descontaminar suelos que han sido afectados por sustancias tóxicas o contaminantes. Estos organismos tienen la capacidad de descomponer, transformar o absorber los contaminantes, haciendo que el suelo vuelva a ser seguro (Bordino, 2021).

Los procesos más usados en la biorremediación son la sorción, precipitación, lixiviación y volatilización de metales pesados. Sin embargo, son necesarios más estudios sobre la diversidad microbiana de los sitios contaminados con metales pesados para encontrar cepas mejor adaptadas y con mayor capacidad de biorremediación de estos contaminantes (Minera, 2017).

La biorremediación, entre la que se encuentra la micorremediación, utiliza el metabolismo de microorganismos para convertir contaminantes ambientales en sustancias menos dañinas o inofensivas, lo que la hace una tecnología interesante

que requiere pocos insumos químicos y poca energía. Durante los últimos veinte años, muchos especialistas en micología han estudiado distintas especies de hongos por su capacidad para descomponer compuestos orgánicos (Dinakarkumar *et al.*, 2024).

1.5.3 Micorremediación

La micorremediación es una opción sostenible en la que se emplean hongos para descomponer sustancias contaminantes del medio ambiente, aprovechando las enzimas que estos producen. Algunos hongos tienen la capacidad de descomponer lignina y celulosa, así como otros compuestos con estructuras similares.

Los hongos ligninolíticos, principalmente del grupo Basidiomycetes, son altamente eficientes en la degradación de la lignina, transformándola en moléculas más simples como CO₂ y H₂O. Estos hongos, responsables de la podredumbre blanca de la madera, producen enzimas como lignina-peroxidasas y lactasas, que operan de manera extracelular debido al alto peso molecular de la lignina. Su sistema de degradación les permite tolerar altos niveles de contaminantes y acceder a ellos en el suelo. Además, estas enzimas son inespecíficas y pueden degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos, lo que facilita el acceso a la celulosa y hemicelulosa, fuentes de carbono y energía para los hongos (Acevedo, 2015).

La micorremediación se puede llevar a cabo de dos formas principales: in situ y ex situ, los métodos in situ tratan el suelo contaminado directamente en el lugar afectado, mientras que las estrategias ex situ requieren remover el suelo contaminado para procesarlo posteriormente mediante biorremediación. Las técnicas actuales de manejo y eliminación de desechos suelen ser insuficientes para resolver problemas como el empobrecimiento del suelo y el deterioro ambiental, por esta razón, es fundamental buscar alternativas para eliminar contaminantes y así favorecer un desarrollo sostenible (Dinakarkumar *et al.*, 2024).

De acuerdo con Lazarte (2023), se realizó la obtención del micelio de hongos de pudrición blanca (*Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus djamor* y *Lentinula edodes*) a partir

de carpóforos provenientes de tres distritos de la Región del Cusco, los cuales utilizaron diferentes sustratos según su lugar de procedencia.

El micelio fue aislado en el laboratorio del Centro de Investigación de Hongos Nutracéuticos (CIPHAM) de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, este procedimiento permitió determinar la relación masa y punto isoeléctrico mediante electroforesis bidimensional (2D), la identificación de las proteínas y/o enzimas de los hongos de pudrición blanca (*Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus djamor*, *Lentinula edodes*), la realización de la secuenciación de proteínas y/o enzimas por espectrometría de masa ESI QTOF MS/MS, y permitió el análisis bioinformático de las secuencias en el marco de un proceso de biorremediación.

Los hongos, bacterias y levaduras que viven en el suelo tienen la capacidad de absorber metales pesados, aprovechando estos contaminantes como recurso para obtener nutrientes y energía, y transformándolos en compuestos solubles (Cayotopa-Torres *et al.*, 2021).

Existen varios niveles de control con métodos biológicos, principalmente con hongos antagonistas. Por ejemplo, las especies de *Trichoderma*, *Fusarium*, *Gliocladium* o *chaetomium*. También existen otros hongos eficaces para la micorremediación, como lo son la *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma yunnanense*, *Teratosperma oligocladium* o *Laterispora brevirama* (López, 2025).

1.5.4 *Trichoderma*

El género *Trichoderma* está conformado por hongos filamentosos y saprófitos pertenecientes a la subdivisión *Ascomycota* y al orden *Hypocreales*. Estos hongos se encuentran comúnmente en suelos de diversos ecosistemas y se destacan por su capacidad para producir una variedad de enzimas y compuestos metabólicos secundarios. Estas sustancias les permiten colonizar las raíces de las plantas, favoreciendo su crecimiento, además de actuar como agentes de control biológico (Cruz-Choappa *et al.*, 2022).

Los hongos del género *Trichoderma* spp. funcionan como endófitos en las plantas y destacan por su habilidad bioquímica para producir diversos metabolitos secundarios (MS), los cuales tienen usos importantes en la agricultura, la industria farmacéutica y la elaboración de alimentos. Algunos de los MS más importantes que produce *Trichoderma* incluyen ácido harziánico, alameticinas, harziandiona, tricoteceno, tricodermina, harzianum A, tricholinas, peptaiboles, 6-pentil- α -pirona, gliovirina, ácido heptéldico, aldehído fórmico, gliotoxina y viridina.

Estos hongos filamentosos necesitan pocos nutrientes para desarrollarse, aunque su crecimiento es favorecido cuando hay materia orgánica disponible. Las condiciones ideales de temperatura y humedad para su desarrollo se encuentran entre 25 y 30 °C, no obstante, tienen la capacidad de adaptarse y sobrevivir incluso en ambientes con temperaturas, niveles de pH o salinidad extremos (Argumedo-Delira *et al.*, 2018).

La producción y el funcionamiento de los metabolitos secundarios en el hongo *Trichoderma* están fuertemente influenciados por la especie, la cepa y diferentes factores ambientales, esto implica que incluso aislamientos pertenecientes a la misma especie de *Trichoderma* pueden reaccionar de manera diferente ante un mismo fitopatógeno. No obstante, aunque se han logrado importantes avances, todavía hay muchos aspectos desconocidos sobre cómo se lleva a cabo su biosíntesis y cuáles son exactamente sus mecanismos de acción (Suarez-Medina *et al.*, 2024).

Diversos estudios han reportado que ciertas especies de *Trichoderma* tienen la capacidad de inmovilizar metales pesados y quelarlos mediante procesos de biolixiviación. Por ejemplo, señalan que metales como cobalto, cromo, cobre, cadmio y níquel requieren concentraciones mínimas inhibitorias para afectar el crecimiento de *Trichoderma* spp. en condiciones controladas. Asimismo, se informa que el cromo hexavalente [Cr (VI)] puede ser removido eficazmente en soluciones acuosas utilizando el hongo *Trichoderma viride* (González, 2019).

En un artículo publicado por Cayotopa-Torres *et al* (2021), indica que la *Trichoderma* nativa de árboles de cacao fue utilizada para llevar a cabo un proceso de micorremediación donde se removió la concentración de cadmio (Cd) presente en el suelo. En los resultados de ese artículo reporta que *Trichoderma* es sensible a la presencia de cadmio (Cd), aunque puede resistir y mantenerse viable hasta cierta concentración, siendo que dos especies lograron sobrevivir a niveles de 200 mg/L de Cd.

La capacidad de distintas cepas de *Trichoderma* spp. para tolerar el cadmio a distintas concentraciones refleja su posible influencia sobre la absorción de este metal por las plantas de cacao, lo que sugiere que podrían emplearse como organismos tolerantes al estrés causado por Cd, demostrando que tanto cepas nativas como mutantes poseen el potencial para soportar el estrés provocado por los metales pesados.

1.6 Zona de estudio

El suelo para tratar fue recolectado de la presa “La Alberca”, ubicada en el municipio de Cuerámara, Guanajuato. A pesar de su reconocimiento como uno de los principales espacios naturales del municipio y de estar rodeada por una gran variedad de aves y flora, la presa, situada en la comunidad de Tres Villas, ha enfrentado durante años un serio problema de contaminación, en gran parte ocasionado por los desechos arrastrados por el Río Turbio (Garibaldi, 2019).

De acuerdo con Alvarado (2025), la atención a los campesinos ejidatarios forma parte de un compromiso establecido entre las autoridades municipales y los agricultores de los ejidos Paso de Leones, Galera de la Grulla, Cuerámara y Tres Villas, manteniendo diálogos y reuniones de trabajo para planear obras destinadas al reforzamiento del bordo de esta presa, la cual tiene una capacidad de 5 millones de metros cúbicos, ver figura (1.1).

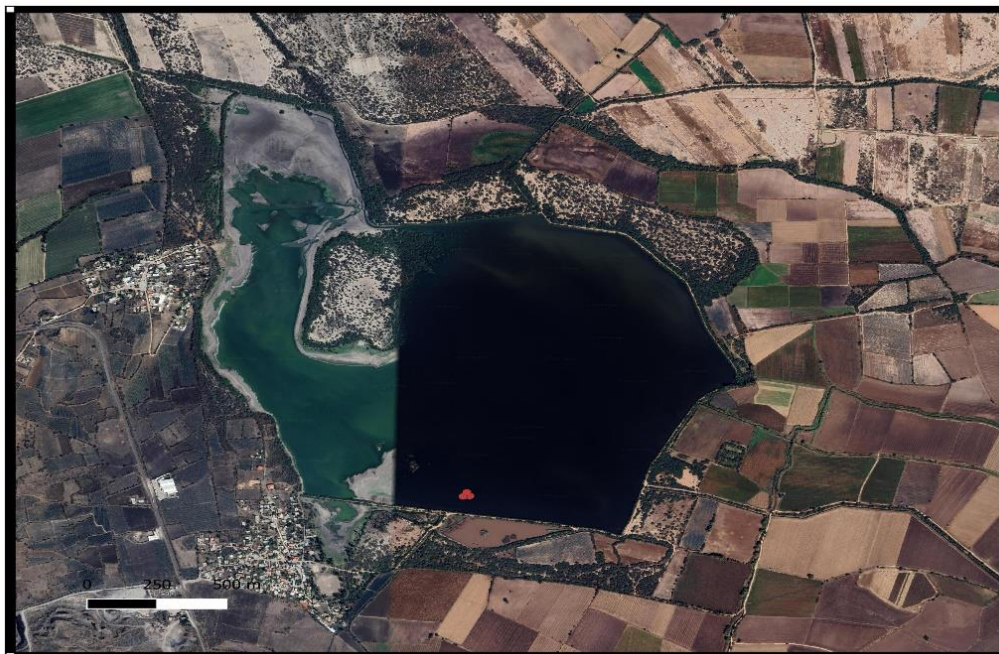


Figura 1.1. Mapa de la presa "La Alberca" (Elaborado por Martínez, 2024).

Dicho programa de reforzamiento fue diseñado con base en la información recabada y tuvo como objetivo la protección de una zona agrícola significativa. La presa "La Alberca" beneficia con riegos aproximados a mil hectáreas dedicadas al cultivo de trigo, cebada, garbanzo, alfalfa, maíz y sorgo (Alvarado, 2025).

Capítulo 2: GENERALIDADES DEL PROYECTO

2.1 Planteamiento del problema

México, es un país que enfrenta la problemática de contaminación ocasionada por metales pesados, la cual día con día va en aumento. Dentro de estos metales se encuentra el cromo, el cual cuenta con un alto nivel de toxicidad (Covarrubias, 2017). En todos los estados se utilizan vehículos de automotor, esta acción incrementa la amenaza de contaminación por cromo hexavalente esto debido a que este material se encuentra presente en la pintura utilizada para estos, los gases emitidos por esta pintura resultan ser perjudicial tanto para la salud de las personas, como para el medio ambiente (Rattix Motors S.L, 2023).

En particular la exposición excesiva al Cr (VI) puede desencadenar algunas enfermedades como lo son: irritación en la piel, problemas respiratorios, problemas renales o en el peor de los casos puede causar la muerte (Fuentes, 2023). Las personas que laboran con cromo hexavalente están más propensas a sufrir daños en su salud esto debido a que los compuestos de este metal se absorben más fácilmente por vía pulmonar y tienen una acción oxidante sobre el tracto respiratorio, siendo más probable el desarrollo de enfermedades como bronquitis crónica, asma, hipertrofia mucosa y eventualmente cáncer, así también como la acumulación de cromo en pulmones, hígado y riñón (Sabaté, 2022).

Además, el cromo hexavalente genera daños al ambiente donde entra la contaminación de agua y suelo (Fuentes, 2023). El Cr (VI) presente en el agua, afecta su calidad y reduce la cantidad de oxígeno que se encuentra en ella, provocando la muerte de peces, provocándoles problemas en las agallas afectando su respiración, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores (Godínez, 2024). Este metal es altamente soluble en agua lo que facilita su disolución y llega a provocar la contaminación del suelo.

Por otro lado, este metal puede persistir por un largo periodo de tiempo, lo que conllevaría a en un futuro consumir alimentos contaminados de cromo (Fuentes, 2023). Esto se debe a que los cultivos cuentan con sistemas que administran este metal, sin embargo, cuando aumenta la cantidad de este contaminante en el suelo

también aumentan las concentraciones en las plantas, acidificando el suelo y generando mayor vulnerabilidad a que los cultivos absorban este metal pesado presente (Dickson, 2016).

Además, en algunos estados como Jalisco, Querétaro y Guanajuato existen industrias curtidoras que trabajan con cromo para sus procesos. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Guanajuato es el estado que ocupa el primer lugar a nivel nacional en la producción de curtido de cuero y piel, con el 69%, esto se debe a que diversos municipios pertenecientes al estado cuentan con industrias dedicadas al curtido (Contreras, 2022).

En la ciudad de León, Guanajuato, se encuentran instaladas industrias del curtido la cual está catalogada como la principal fuente de contaminación por el metal pesado; cromo. Según el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, en México existen actualmente 1,002 unidades económicas dedicadas a la industria de la curtiduría, de estas, 736 se localizan en el estado de Guanajuato, y dentro de ese grupo, 713 están ubicadas en el municipio de León, lo que representa el 71 % del total nacional (González *et al.*, 2020).

De acuerdo con Quintanar (2020), Ernesto Vega, presidente de la Cámara de la Industria de la Curtiduría (CICUR), indicó que en León hay alrededor de mil 200 tenerías, en las cuales trabajan entre 12 mil y 14 mil personas.

Esto es motivo de preocupación debido a que las descargas generadas por estas industrias llegan a ser vertidas en el Río Turbio. En 2005, un estudio de la UNAM realizado por el Instituto de Geología, titulado 'Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el Río Lerma, estado de Guanajuato, México', confirmó la presencia de metales pesados en el Río Turbio, revelando que sus niveles superan tanto los límites nacionales como los estándares internacionales. El análisis identificó la presencia de arsénico, cadmio, cobalto, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, níquel y zinc en el agua del río (Arriaga, 2023).

Bautista (2017), indica que la mayoría de los metales pesados de origen humano que han contaminado el Río Turbio han comenzado a ingresar desde la década de 1950, cuando se empezó a industrializar León, San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos. Además, las 79 comunidades, con poblaciones de entre mil y dos mil quinientos habitantes, ubicadas a lo largo del Río también contribuyen a la contaminación al verter sus aguas residuales en él. Los municipios atravesados por el Río Turbio son Abasolo, Cuerámaro, Manuel Doblado, León, Pénjamo, Purísima del Rincón y Romita.

Derivado de esto se estableció a través de análisis colorimétricos que en la Presa “La Alberca”, situada en la comunidad de Tres Villas, Cuerámaro, Guanajuato, se detectó la presencia de cromo hexavalente Cr (VI) en una concentración de 1.496 mg/L, la cual rebasa los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, (SEMARNAT, 2022). Esta presa recibe agua del Río Turbio, el cual a su vez contiene descargas de aguas residuales provenientes de las industrias curtidoras de la ciudad de León.

2.2 Justificación

La eliminación de cromo hexavalente en el suelo es de gran importancia debido a que este metal es altamente contaminante, lo que provoca la infertilidad de suelo debido a la acumulación de este metal en grandes concentraciones, de las cuales una parte puede ser absorbida por especies de plantas pertenecientes a esa área, afectando a la cadena trófica y otra parte se puede derramar en cuerpos de agua cercanos, con base a lo anterior se resalta la importancia de encontrar algún tratamiento para su reducción tomando en cuenta que sea amigable con el medio ambiente (Martinez, 2018).

La biorremediación funciona como una técnica para degradar contaminantes orgánicos permitiendo la disminución de toxicidad de estos utilizando la actividad biológica principalmente la de microorganismos a través de reacciones que forman parte de su metabolismo. Este proceso además de favorecer el medio ambiente, en comparación de métodos fisicoquímicos como la estabilización físico-química, la

extracción con ácido clorhídrico, el lavado del suelo con agentes extractantes, la adición de sustancias orgánicas e inorgánicas al suelo contaminado y la desorción térmica a temperaturas entre 320 y 560 °C, resulta ser más eficaz y menos costoso (Zúñiga, 2021).

En este proyecto se trabajó con una variante de la biorremediación, con la micorremediación utilizando la cepa *Trichoderma yunnanense* la cual se caracteriza por ser capaz de producir una serie de enzimas y metabolitos que pueden actuar como agentes de control biológico. Este microorganismo trabaja mediante la biolixiviación siendo capaz de inmovilizar los metales, lo que favorece a encontrar un posible tratamiento para la disminución de cromo hexavalente en suelo de presa “La Alberca”, municipio de Cuerámara, proveniente de las industrias curtidoras de la ciudad de León Guanajuato.

2.3 Hipótesis

Se espera que alguna de las cepas de *Trichoderma yunnanense* presente las características necesarias para realizar la micorremediación de suelos contaminados con cromo hexavalente, provenientes de la presa “La Alberca” en el municipio de Cuerámara, Guanajuato, logrando una disminución del contaminante en un rango del 85-95%.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de *Trichoderma yunnanense* para remover cromo hexavalente (Cr VI) de suelos contaminados.

2.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la presencia de cromo hexavalente (Cr VI) en muestras de suelo recolectadas en presa “La Alberca”, Cuerámara, Guanajuato.
- Valorar las características fisicoquímicas del suelo de la presa “La Alberca”, Cuerámara, Guanajuato.

- Diseñar los tratamientos de micorremediación y los controles experimentales para la remoción de Cr (VI) en suelos contaminados mediante la inoculación con las cepas de *Trichoderma yunnanense* usando cuatro tratamientos distintos.
- Establecer y aplicar los tratamientos de micorremediación con la cepa *Trichoderma yunnanense* en las muestras de suelo contaminadas con Cr (VI).
- Evaluar la eficacia de los tratamientos de micorremediación con *Trichoderma yunnanense* para la remoción de Cr (VI) en los suelos contaminados, mediante la comparación de las concentraciones finales al término del tratamiento.

Capítulo 3: METODOLOGÍA

3.1 Muestreo del terreno

La zona de estudio que se estableció para realizar el muestreo de suelo fue la Presa “La Alberca”, ubicada en la comunidad de Tres Villas, en el municipio de Cuerámara, Guanajuato; debido a los antecedentes que se tienen sobre la presencia de cromo hexavalente (Bermúdez y López, 2017).

3.1.1 Ubicación del terreno y muestreo

El área donde se llevó a cabo el muestreo se encuentra en la Presa “La Alberca”, en el municipio de Cuerámara, cercano a Abasolo, en el estado de Guanajuato, México. Su ubicación aproximada es a 20.4503° de latitud norte y -101.5280° de longitud oeste.

La recolección de muestras se llevó a cabo de acuerdo con las directrices de la NMX-AA-132-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2017), que establece las normas técnicas para la obtención y manejo de muestras con el fin de caracterizar suelos en el área de estudio. Esto incluye la identificación y cuantificación de metales y metaloides, tales como arsénico, bario, berilio, cadmio y cromo hexavalente.

Materiales y equipo:

- Barrena
- Pala
- Bolsas de polietileno negras
- GPS Data®

Metodología:

1. Para recolectar las muestras simples, se empleó una barrena de acero inoxidable (ver figura 3.1), con la que se extrajeron pequeñas cantidades de suelo a una profundidad de entre 30 y 60 cm.



Figura 3.1. Barrena para suelos estándar AMS acero inoxidable (GreenForest Tienda Forestal, 2025).

2. Se registraron las coordenadas de cada ubicación donde se tomaron las muestras simples (Figura 3.2).



Figura 3.2. Recolección de la muestra (Tomado por Martínez, 2024).

3. Todas las muestras simples se colocaron en una bolsa de polietileno negra para mantenerlas seguras y facilitar su traslado al laboratorio, evitando

modificaciones por la luz solar, donde posteriormente se generó con estas una muestra compuesta mediante el método de cuarteo.

3.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos del suelo

En este apartado se muestra la determinación de algunos parámetros fisicoquímicos que se llevaron a cabo para la muestra de suelo utilizada, estos análisis se realizaron con un equipo de pruebas para suelo.

3.2.1 Textura del suelo

Existe una variedad de técnicas para determinar la textura de un suelo. En este caso, se utilizó la técnica más común en laboratorios, que es la de volumen de sedimentación.

Materiales y equipo:

- Botella de plástico de paredes lisas de 625 ml.
- Regla.
- Muestra de suelo.

Reactivos:

- H₂O.

Procedimiento:

1. Se utilizó una regla para marcar 5 cm en la botella. Después se agregó muestra de suelo hasta la línea marcada.
2. Se agregó una cantidad apropiada de H₂O y se agitó la botella durante 1 minuto hasta que se mezcló todo bien.
3. La botella se colocó en una superficie plana y se dejó sedimentar por 40 segundos. Luego con la regla se midieron los cm de arena sedimentada.
4. Para medir los cm de limo y arcilla, se dejó sedimentar la muestra de suelo dentro de la botella en una superficie plana durante 24 horas en total reposo (Ver figura 3.3).



Figura. 3.3. Volumen de sedimentación (Tomado por Martínez, 2024).

Cálculos:

5 cm de suelo → 100%	→	5 cm de suelo → 100%	
X cm de arena ←? %		2.8 cm de arena ←? %	= 56 %
5 cm de suelo → 100%	→	5 cm de suelo → 100%	
X cm de limo ←? %		1.4 cm de limo ←? %	= 28 %
5 cm de suelo → 100%	→	5 cm de suelo → 100%	
X cm de arcilla ←? %		0.8 cm de arcilla ←? %	= 16 %

Para identificar el tipo de suelo que se tiene fue necesario utilizar el triángulo de texturas para suelo.

3.2.2 Determinación de pH

Para llevar a cabo este procedimiento, se utilizó el Backpack de pruebas para suelo, en el cual se incluyen los manuales de uso (Hanna Instruments, 2025).

Materiales y equipo:

- Muestra de suelo.
- Tubo de reacción.

- Cuchara pequeña.
- Electrodo calibrado.
- Vaso de precipitados.
- Tarjetas colorimétricas.

Reactivos:

- Indicador de pH HI-3896.
- Agua destilada.

Procedimiento:

1. Se llenó un tubo de reacción hasta la marca inferior (2.5 ml) usando el reactivo indicador de pH HI-3896. Para medir la cantidad, se utilizó una tarjeta graduada.
2. Se utilizó una cuchara pequeña incluida en el kit para agregar seis porciones de muestra de suelo.
3. Posteriormente se colocó la tapa de nuevo y se agito el tubo suavemente durante un minuto. A continuación, se comparó el color obtenido con la tarjeta de colores de pH, esto conocido como método colorimétrico (Figura 3.4).

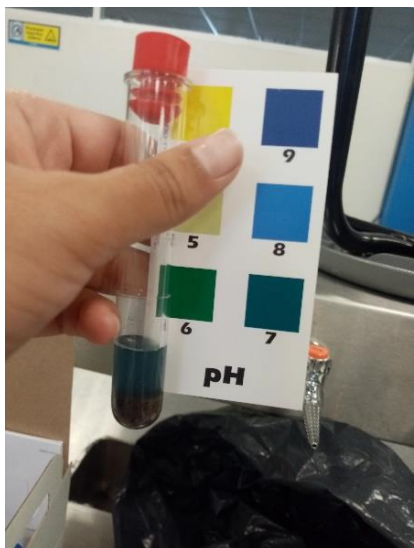


Figura 3.4. Método colorimétrico de pH (Tomado por Martínez, 2024).

4. La muestra del tubo se transfirió a un vaso de precipitados para realizar la medición combinada de pH.
5. Para esto se sumergió el electrodo en la solución revolviendo esta suavemente. Después se enjuagó el electrodo muy bien con agua destilada.

3.2.3 Determinación de Nitrógeno

Para llevar a cabo este procedimiento, se utilizó el Backpack de pruebas para suelo, en el cual se incluyen los manuales de uso (Hanna Instruments, 2025).

Materiales y equipo:

- Muestra de suelo.
- Tubo de reacción.
- Cuchara pequeña.
- Tarjetas colorimétricas.
- Pipeta.

Reactivos:

- Solución de extracción HI-3896.

- HI 3896-N.

Procedimiento:

1. Se llenó el tubo de reacción hasta la tercera marca de graduación (7.5 ml) utilizando el reactivo HI-3896.
2. Se utilizó una cuchara pequeña incluida en el kit para añadir nueve porciones de muestra de suelo. Posterior a eso, se colocó de nueva cuenta la tapa al tubo y se agito suavemente durante un minuto.
3. Se permitió que el tubo sedimentara durante al menos cinco minutos. Posteriormente se utilizó una pipeta para transferir 2.5 ml del extracto general de suelo a un tubo de reacción limpio.
4. Se añadió el contenido de un paquete de reactivo HI 3896-N al tubo. Posteriormente se colocó la tapa de nuevo y se agito el tubo enérgicamente durante 30 segundos para asegurarse de que el reactivo se disolviera completamente.
5. El tubo se dejó reposar durante 30 segundos. A continuación, se comparó el color rosa obtenido con la tarjeta de colores N (Ver figura 3.5).

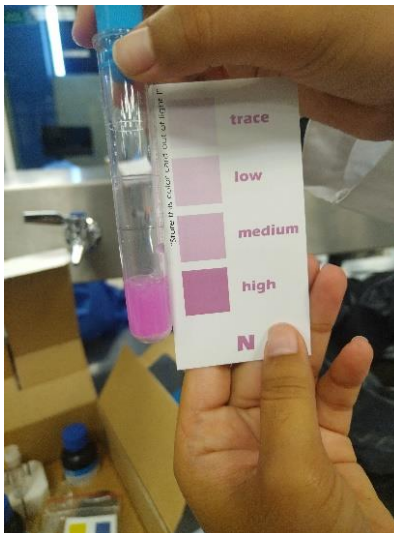


Figura 3.5. Método colorimétrico de Nitrógeno (Tomado por Martínez, 2024).

3.2.4 Determinación de Fósforo

Para llevar a cabo este procedimiento, se utilizó el Backpack de pruebas para suelo, en el cual se incluyen los manuales de uso (Hanna Instruments, 2025).

Materiales y equipo:

- Muestra de suelo.
- Tubo de reacción.
- Cuchara pequeña.
- Tarjetas colorimétricas.
- Pipeta.

Reactivos:

- Solución de extracción HI-3896.
- HI 3896-P.

Procedimiento:

1. Se llenó un tubo de reacción hasta la tercera marca de graduación (7.5 ml) con la solución de extracción HI-3896. Se utilizó una cuchara pequeña incluida en el kit para añadir nueve porciones de muestra de suelo.
2. Posteriormente se colocó de nuevo la tapa en el tubo de reacción y se agitó el tubo suavemente durante un minuto. Se dejó el tubo en reposo durante al menos cinco minutos.
3. Fue necesario utilizar la pipeta para transferir 2.5 ml del extracto general de suelo a un tubo de reacción limpio.
4. Se agregó el contenido de un paquete de reactivo HI 3896-P al tubo. Se colocó la tapa nuevamente y se agitó el tubo enérgicamente durante 30 segundos para asegurar la disolución completa del reactivo.

5. Se dejó reposar el tubo durante 30 segundos. A continuación, se comparó el color azul resultante con la tarjeta de colores P (Figura 3.6).

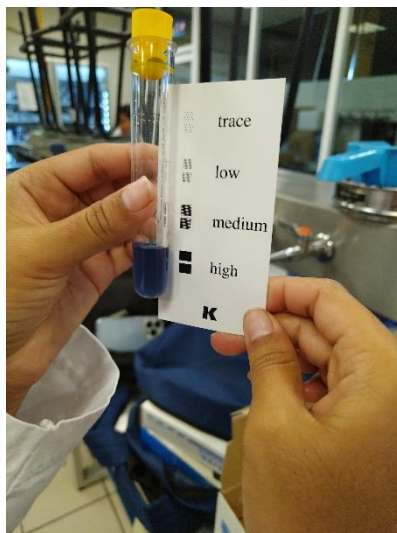


Figura 3.6. Método colorimétrico de Fósforo (Tomado por Martínez, 2024).

3.2.5 Determinación de Potasio

Para llevar a cabo este procedimiento, se utilizó el Backpack de pruebas para suelo, en el cual se incluyen los manuales de uso (Hanna Instruments, 2025).

Materiales y equipo:

- Muestra de suelo.
- Tubo de reacción.
- Cuchara pequeña.
- Tarjeta turbidimétrica.
- Pipeta.

Reactivos:

- Solución de extracción HI-3896.
- H1-3896-PO.

Procedimiento:

1. Se llenó un tubo de reacción hasta la tercera marca de graduación (7.5 ml) utilizando la solución de extracción HI-3896. Se empleó una cuchara pequeña incluida en el kit para añadir nueve porciones de muestra de suelo.
2. Se colocó la tapa nuevamente en el tubo de reacción y se agitó el tubo suavemente durante un minuto.
3. Se dejó el tubo en reposo durante al menos cinco minutos. Posteriormente se utilizó una pipeta para transferir 0.5 ml del extracto general de suelo transparente a un tubo de reacción limpio.
4. Se llenó el tubo hasta la marca de graduación inferior (2.5 ml) con la solución de extracción HI-3896. Luego se añadió el contenido de un paquete de reactivo HI 3896-PO.
5. Posteriormente se colocó la tapa en el tubo y se agito vigorosamente durante 30 segundos para asegurarse de que el reactivo se disolviera por completo. A continuación, se hizo la lectura de la tarjeta de referencia para K (Ver figura 3.7).



Figura 3.7. Método colorimétrico de Potasio (Tomado por Martínez, 2024).

3.2.6 Determinación de humedad

El análisis para la determinación de humedad fue realizado en base a las directrices que marca la NMX-AA-016-1984 (SEMARNAT, 2023).

Material y equipo:

- Capsulas de porcelana de 100 ml aprox.
- Tamiz con malla de 2 mm de diámetro.
- Desecador con indicador de sílica gel.
- Pinzas para crisol.
- Balanza analítica con precisión de 0.1 mg.
- Estufa de calentamiento.

Reactivos:

- Muestra de suelo.

Procedimiento:

1. Se colocaron a peso constante las capsulas de porcelana: Se colocó las cápsulas en un horno a 105 °C durante una hora. Luego, se transfirieron al desecador y se dejaron enfriar durante una hora. Después, se pesaron y registraron los datos obtenidos.
2. Se repitió el proceso mencionado previamente hasta lograr que la cápsula alcanzara un peso constante, con variaciones inferiores a 0.5 mg.
3. Se pesó la cápsula y posterior se anotó el peso obtenido.
4. Se colocó alrededor de 5 g de la muestra en la cápsula y se anotó el peso.
5. Se introdujo la cápsula que contiene la muestra en la estufa a 105 °C durante dos horas.
6. Después se retiró la cápsula de la estufa y se trasladó al desecador para permitir que se enfriara durante una hora.

7. Luego se determinó el peso de la cápsula con la muestra y fue anotado (Figura 3.8).

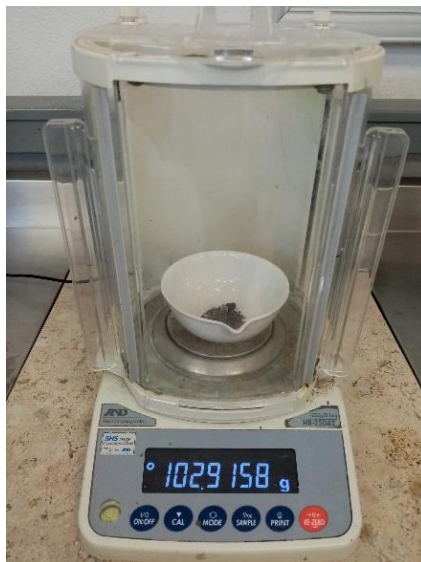


Figura 3.8. Peso de la capsula con la muestra húmeda (Tomado por Martínez, 2024).

8. Posterior a eso se calculó el porcentaje de humedad utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de humedad de la muestra } (\%H) = A - B / A \times 100.$$

Donde:

A = peso de la muestra con humedad de campo (g).

B = peso de la muestra seca (g).

9. Reportar el porcentaje de humedad.

3.3 Medición colorimétrica para la presencia de cromo hexavalente

El procedimiento para la medición colorimétrica del cromo hexavalente se realizó siguiendo el protocolo establecido por la SEMARNAT (2007).

Material y equipo:

- Pipetas volumétricas (5 ml).
- Matraces volumétricos (100 y 50 ml).

- Balanza analítica calibrada.
- Estufa de calentamiento de 100-110°C.
- Espectrofotómetro con paso de luz de 1 cm o más.
- Vasos de precipitados.

Reactivos:

- Agua destilada.
- Ácido sulfúrico concentrado.
- Ácido sulfúrico al 10%: diluir 10 ml de ácido a 100 ml con agua destilada.
- Difenilcarbazida: Se pesó y disolvió 250 mg de 1.5-difenilcarbazida en 50 ml de acetona; luego se almacena en una botella oscura de preferencia ámbar.
- Acetona.
- Dicromato de potasio
- Solución madre de dicromato de potasio (seca por una hora a 110°C): se pesó 141.4 mg de dicromato de potasio seco y se disolvió en agua, todo fue diluido en un matraz volumétrico (1ml = 50 µg Cr).
- Solución estándar de dicromato de potasio: se diluyó 10 ml de la solución madre de dicromato de potasio con 100 ml de agua destilada en un matraz volumétrico.

Procedimiento:

1. Para la preparación de la curva de calibración, se prepararon soluciones estándar con concentraciones de 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.6 y 0.75 mg/L. Además, se preparó un blanco de reactivos utilizando agua destilada, a la cual se añadieron los mismos reactivos que se utilizaron en las soluciones estándar.

2. Para el desarrollo del color, se encendió el espectrofotómetro y se ajustó la longitud de onda a 540 nm. A continuación, se transfirieron 95 ml de la muestra previamente tratada a un matraz volumétrico de 100 ml.
3. Se añadieron 2 ml de la solución de difenilcarbazida y se mezcló bien. Posteriormente, se incorporó 2 ml de la solución de ácido sulfúrico al 10% con el fin de ajustar el pH a un valor de 2. A continuación, se completó el volumen de la mezcla hasta 100 ml utilizando agua destilada y se aseguró una mezcla homogénea.
4. Para el análisis de las muestras, fue necesario esperar entre 5 y 10 minutos para permitir el desarrollo completo del color (Ver figura 3.9). Luego, se transfirió una porción de la solución a una celda de cuarzo de 1 cm de grosor. Finalmente, se midió la absorbancia de cada uno de los estándares utilizando un espectrofotómetro.



Figura 3.9. Desarrollo de color de las muestras estándar (Tomado por Martínez, 2024).

3.4 Digestión alcalina para cromo hexavalente

Este procedimiento fue realizado conforme a la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007).

Materiales:

- Matraces volumétricos (100 ml).
- Matraces volumétricos (1 L).
- Pipetas volumétricas (5 ml).
- Vidrios de reloj.
- Barras de agitación magnética.
- Termómetro calibrado.
- Vasos para digestión.
- Probeta graduada (100 ml).
- Embudos de vidrio o polipropileno para filtración.
- Filtros de membrana (0.45 μm) de celulosa o policarbonato.

Equipo:

- Potenciómetro calibrado.
- Balanza analítica calibrada (sensibilidad a 0.0001 g).
- Parrilla de agitación con calentamiento (temperatura entre 90-95 °C).
- Estufa de calentamiento.
- Bomba de vacío.
- Tamices de acero inoxidable (2 mm diámetro).

Reactivos:

- Agua destilada.
- Ácido nítrico: 5M
- Carbonato de sodio: Na_2CO_3 anhidro.
- K_2HPO_4 .

- KH_2PO_4 .
- Solución amortiguadora a pH 7: (Se pesaron 87.09 g de K_2HPO_4 y 68.04 g de KH_2PO_4 , y se disolvieron en 700 ml de agua. Luego, se transfirió la solución a un matraz volumétrico de 1 L y se completó hasta la marca de aforo).
- Solución de digestión: (Se disolvió 20 ± 0.05 g de NaOH y 30 ± 0.05 g de Na_2CO_3 en agua en un matraz volumétrico (1 L) y se completó hasta la marca de aforo con agua. Después se guardó en un recipiente hermético de polietileno. Se preparo una nueva solución cada mes y se verifico que el pH fuera de 11.5 o superior; en caso contrario, desechar la solución.

Procedimiento:

1. Se realizó la mezcla y el tamizado de la muestra, considerando que tiene humedad de campo, utilizando un tamiz con malla de 2 mm de diámetro en las aberturas. En el caso de trabajar con muestras que presenten un alto contenido de humedad, se debe emplear un tamiz cuya apertura sea superior a 2 mm pero inferior a 4 mm.
2. Se pesaron $2.5 \text{ g} \pm 0.10 \text{ g}$ de la muestra previamente mezclada y fueron colocados en un vaso de digestión de 250 ml, asegurándose de que esté limpio y correctamente etiquetado.
3. A continuación se agregaron 50 ± 1 ml de solución de digestión a cada muestra utilizando una probeta graduada. Luego, se incorporaron aproximadamente 400 mg de MgCl_2 y 0.5 ml de solución buffer de fosfato 1 M. Finalmente, la muestra fue cubierta con un vidrio de reloj.
4. Se mantuvo la muestra en agitación continua durante 5 minutos (sin aplicar calor) utilizando una parrilla de agitación.
5. Luego se calentó la muestra a una temperatura de 90-95 °C y se mantuvo en este rango durante una hora, asegurando una agitación continua (Figura 3.10).



Figura 3.10. Calentamiento de la muestra con agitación continua (Tomado por Martínez, 2024).

6. La mezcla fue enfriada de forma paulatina mientras se agitaba de manera continua hasta alcanzar la temperatura ambiente. Luego, se transfirió el contenido a los dispositivos de filtración. Los vasos de digestión se enjuagaron utilizando tres porciones de agua y los enjuagues se depositaron al sistema de filtración. Se realizó la filtración empleando membranas de 0.45 μm . Después, se enjuagó la parte interna del sistema de filtración y el filtro con agua, y se vertieron tanto el filtrado como los enjuagues en un recipiente limpio de 250 ml.
7. Posterior a eso se introdujo un accesorio de agitación en el vaso de digestión que contenía la muestra y fue situado en un agitador. Se agregó lentamente la solución de ácido nítrico 5M al recipiente, gota a gota, hasta que el pH de la mezcla fue ajustado a 7.5 ± 0.5 . Se utilizó un potenciómetro previamente calibrado para controlar el pH. Si el pH se aleja del rango establecido, será necesario desechar la solución de digestión y realizar el proceso de digestión nuevamente.
8. Luego se retiraron los dispositivos de agitación y se enjuagaron, recogiendo los enjuagues en un recipiente. Después se transfirieron de manera

cuantitativa el contenido de los recipientes a matraces volumétricos de 100 ml y se completó el volumen con agua destilada. Se aseguro mezclar la solución de forma homogénea.

3.5 Producción artesanal de *Trichoderma*

El cultivo de la cepa se realizó siguiendo el procedimiento marcado en el manual de producción artesanal de la *Trichoderma* (Sivila y Álvarez, 2013).

Material y equipo:

- Recipientes de vidrio (8 de 450 ml).
- Gasas quirúrgicas.
- Algodón.
- Cinta adhesiva .
- Aluminio.
- Bisturí .
- Vaso de precipitado (50 ml).
- Guantes de látex.
- Sustrato (arroz).
- Olla o cacerola de cocina.
- Estufa de gas.
- Mechero de gas.
- Autoclave.
- Balanza analítica calibrada.

Reactivos:

- Agua destilada.
- Alcohol etílico.

- Colonias de la cepa *Trichoderma*.

Procedimiento:

1. Se puso a calentar una olla con agua destilada hasta que hirvió. Una vez que alcanzo el punto de ebullición, se añadió el sustrato (arroz) y se mantuvo en ebullición durante 5 minutos, controlando el tiempo.
2. Luego se escurrió el sustrato de inmediato y se colocó en bandejas, permitiendo que se aireara y que los granos quedaran separados.
3. Posteriormente se elaboraron tapones con las gasas y algodón para los recipientes de vidrio, de manera que quedaran ajustados y firmes a la boca de estos. Para esto los recipientes fueron previamente desinfectados con agua, cloro y alcohol.
4. Una vez listo el sustrato, se pesaron 100 g (por cada recipiente) en una balanza previamente calibrada, se agregó el sustrato pesado al recipiente de vidrio y se colocó un tapón y un capuchón de papel aluminio.
5. Posteriormente se procedió a esterilizar los recipientes con el sustrato, colocándolos en la autoclave durante 1 hora y 15 minutos a una temperatura de 105 °C.
6. Transcurrido el tiempo de espera, los recipientes con el sustrato se sacaron de la autoclave y se esperó a que enfriaran a temperatura ambiente en un tiempo de 15-20 minutos.
7. Para la inoculación de *Trichoderma* en los sustratos, se utilizó un cultivo puro de hongo. Para esto se inoculo una sección de 1 cm² del medio de cultivo colonizado por el hongo, se tuvo la precaución de realizarlo en un lugar donde no hubiera corriente de aire (para evitar la contaminación), cerca de un mechero y sobre una mesa previamente desinfectada con alcohol (Ver figura 3.11).



Figura 3.11. Inoculación del sustrato con el hongo (Tomado por Martínez, 2024).

8. Los recipientes con el sustrato inoculado se colocaron en recipientes limpios, donde no hay tierra y están protegidos del sol. Al cabo de 12-15 días el sustrato se cubrirá totalmente con las estructuras del hongo, el que tomará distintos tonos de verde o amarillo dependiendo de la especie o cepa de *Trichoderma*.

3.6 Inoculación del suelo con los tratamientos

Este procedimiento se llevó a cabo con referencia al artículo de Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (Troya y Vaca, 2014).

Material y equipo:

- Papel filtro.
- Mechero de gas.
- Probeta graduada (100 ml).
- Varilla de vidrio.
- Atomizadores de 600 ml.
- Peceras de vidrio (12 piezas).
- Guantes de látex
- Embudo.

Reactivos:

- Alcohol etílico.
- Agua destilada.
- *Trichoderma yunnanense* obtenida previamente del sustrato (arroz).

Procedimiento:

1. Para este apartado, se preparó una solución con la cepa sembrada en el sustrato (arroz) y agua destilada. Para esto se desinfectó el área de trabajo con alcohol etílico previamente y se encendió el mechero para evitar la contaminación de la solución.
2. Se colocaron los ocho recipientes de vidrio obtenidos de la siembra sobre el área previamente desinfectada y se midieron 200 ml de agua destilada con la probeta graduada para cada uno de los recipientes.
3. Posteriormente se agregaron los 200 ml de agua al recipiente que contenía la cepa (flameando la boca del recipiente), se colocó una tapa y se agito el frasco durante un minuto para obtener las esporas. Luego se colocó el papel filtro en el embudo para separar la solución en los atomizadores, estos previamente etiquetados, lavados y desinfectados con alcohol, después se aforo en atomizador con agua destilada hasta los 600 ml. Este procedimiento se realizó con cada uno de los recipientes de vidrio, teniendo cuidado de lavar con agua destilada el embudo y cambiando el papel filtro en cada una de las cepas diferentes.
4. Luego se agregó la muestra de suelo (anteriormente pesada y conservada en bolsas de plástico), en las peceras previamente lavadas y secas. En este caso se tenían 12 bolsas cada una contenía 1 kg de muestra de suelo (tamizada), por esta razón se colocó 1 kg de muestra en cada una de las peceras.

5. Finalmente las peceras que contenían las muestras de suelo fueron humedecidas con las diferentes soluciones obtenidas de las 4 distintas cepas y conservadas en una mesa del laboratorio para su crecimiento (Figura 3.12).

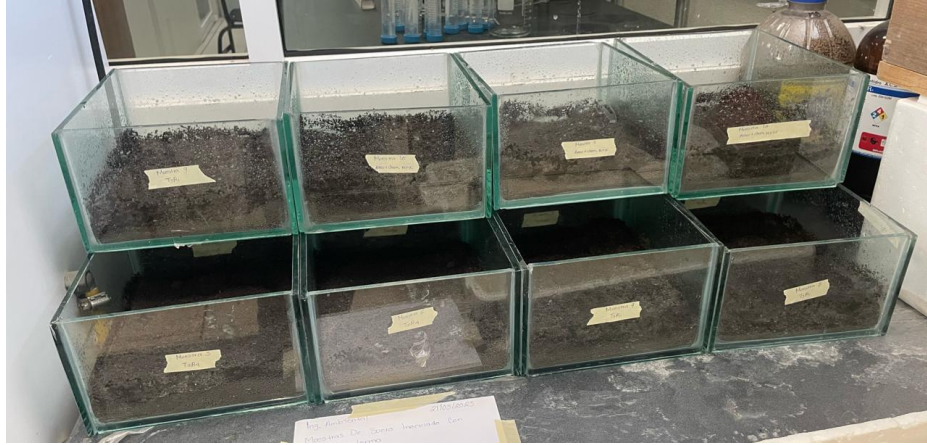


Figura 3.12. Inoculación de las muestras de suelo con el hongo (Tomado por Martínez, 2025).

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención de la muestra de suelo

Para la fase de muestreo en el sitio, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo, de los cuales se recolectaron 60 muestras simples para crear una muestra compuesta por el método de cuarteo. Esta muestra se tomó a una profundidad de 30 cm y tuvo un peso final de 14 kg. Siguiendo lo establecido por la NMX-AA-132-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2017), se registraron las coordenadas de cada uno de los puntos muestreados (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

Tabla 4.1 - Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto de muestreo	Coordenada	
	Latitud	Longitud
1	20°39'57.172"N	-101°40'25.930"W
2	20°39'57.228"N	-101°40'25.871"W
3	20°39'57.131"N	-101°40'26.710"W
4	20°39'57.794"N	-101°40'26.257"W

Fuente: Elaborado por Martínez, (2024).

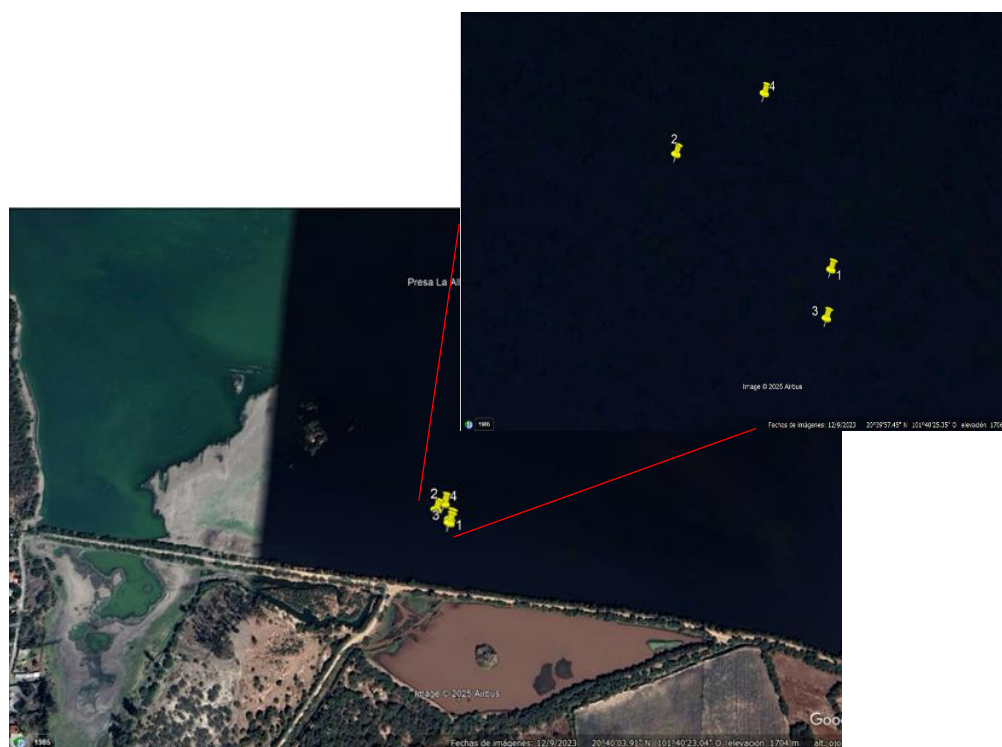


Figura 4.1 – Imagen satelital de los puntos de muestreo (Elaborado por Martínez, 2024).

Posteriormente, la muestra fue transportada y almacenada en el laboratorio del ITESA con el objetivo de analizar los nutrientes presentes en el área y determinar la concentración de cromo (VI) en el suelo (ver Figura 4.2).



Figura 4.2 – Muestra simple extraída de uno de los puntos de muestreo (Tomado por Martínez, 2024).

4.2. Análisis fisicoquímicos

La muestra compuesta obtenida anteriormente también fue utilizada para la caracterización del suelo la cual se muestra en (Tabla 4.2) , el suelo restante fue resguardado para los procesos de micorremediación.

Tabla 4.2 - Caracterización y fertilidad del suelo.

Análisis	Resultado
Textura del suelo	Franco arenoso
pH	Tarjeta colorimétrica: 7 Electrodo: 8.36
Nitrógeno	Alto
Fosforo	Alto
Potasio	Medio
Humedad	2.8 %

Fuente: Elaborado por Martínez, (2024).

Dentro de esta caracterización se encuentra la textura del suelo, la cual fue calculada mediante el triángulo de texturas de suelo (ver Figura 4.3).

Arena: 56%
Limo: 28%
Arcilla: 16%

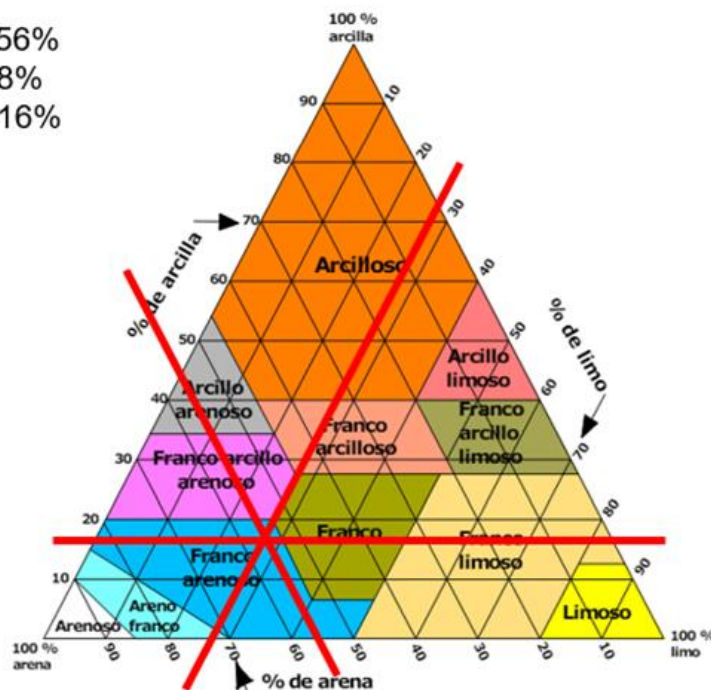


Figura 4.3 – Triángulo de textura de la muestra de suelo (Realizado por Martínez, 2024).

Suelo franco arenoso: Un suelo franco arenoso es aquel que tiene una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla. Esto significa que tiene una buena capacidad de retener agua, pero al mismo tiempo permite el drenaje adecuado (el agua se mueve con relativa rapidez). Este suelo tiene una textura ligera, lo que significa que las partículas son relativamente grandes (debido a la presencia de arena) y, por lo tanto, el suelo tiene buena aireación y no tiende a compactarse fácilmente (Sánchez, 2019).

Los resultados de la muestra de suelo presentados en la tabla anterior indican que este tiene una fertilidad bastante buena en términos de nutrientes esenciales. El nivel alto de nitrógeno sugiere que el suelo es adecuado para el crecimiento vegetativo, favoreciendo el desarrollo de hojas y tallos, mientras que el fósforo alto indica un buen soporte para el crecimiento de raíces y la formación de flores y frutos.

El potasio en niveles medios es suficiente para mantener la salud general de las plantas, aunque podría ser necesario ajustarlo dependiendo del tipo de cultivo.

4.3. Medición colorimétrica y curva de calibración

En esta etapa del proceso se realizaron diluciones con diferentes concentraciones de dicromato (ver tabla 4.3), esto con el fin de obtener las absorbancias de cada una de estas y poder generar la curva de calibración, la cual tiene como función la identificación del estándar en que se encuentra la presencia de cromo en la muestra de suelo (Grafica 4.4).

Tabla 4.3 - Absorbancia obtenida de cada dilución.

Concentraciones Cr (VI) mg/L	Absorbancia
0.05	0.081
0.1	0.139
0.25	0.299
0.5	0.581
0.6	0.718
0.75	0.862

Fuente: Elaborado por Martínez, (2024).

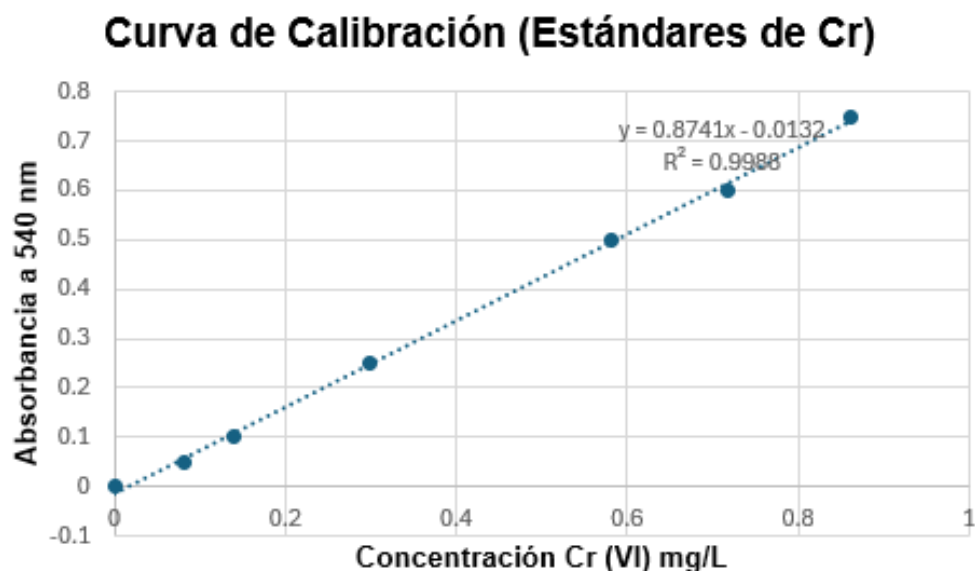


Figura 4.4 – Curva de calibración (Realizado por Martínez, 2024).

4.4. Determinación de Cr (VI)

En este punto se llevó a cabo la digestión alcalina de Cr (VI) de la muestra de suelo compuesta tomada de presa “La Alberca” para la identificación de la presencia de este metal y saber si la concentración obtenida se encontraba dentro de la curva de calibración generada anteriormente. La absorbancia y concentración se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4- Absorbancia y concentración de Cr (VI).

Muestra de suelo	Absorbancia en nm de Cr (VI)	Concentración en mg/L de Cr (VI)
Suelo de la presa “La Alberca”	0.362	0.4292

Fuente: Martínez, (2024).

4.5. Crecimiento de la cepa

En esta etapa se llevó a cabo el crecimiento de la cepa *Trichoderma yunnanense*, la cual se obtuvo entre 10-12 días (ver figura 4.5). Para este cultivo se sembraron 4 colonias diferentes de la cepa, cada una por duplicado.



Figura 4.5 – Crecimiento de la cepa en el sustrato (Tomado por Martínez, 2024).

4.6. Obtención de la solución de la cepa

En este punto se llevó a cabo la obtención de las soluciones con las esporas expulsadas por las cepas, en este caso se recuperaron 4 soluciones diferentes (ver figura 4.6) cada una relacionada con las distintas cepas de *Trichoderma*.



Figura 4.6 – Obtención de las 4 soluciones de las cepas (Tomado por Martínez, 2025).

4.6.1 Eficiencia de la cepa

En este apartado se dan a conocer los resultados obtenidos de los riegos de las muestras de suelo con las soluciones preparadas con las diferentes cepas de *Trichoderma yunnanense*, los cuales se llevaron a cabo durante un mes.

Las digestiones se realizaron en dos fechas diferentes y cada una por triplicado (tabla 4.5 y 4.6).

Tabla 4.5- Absorbancia y concentración obtenida del riego de dos semanas con las cepas.

08/04/2025			
Muestra de suelo	Tipo de cepa	Absorbancia (nm)	Concentración (mg/L)
1	Testigo	0.115	0.1466
2	Testigo	0.156	0.1935
3	Testigo	0.104	0.1340
4	T2R4	0.170	0.2095
5	T2R4	0.151	0.2516
6	T2R4	0.169	0.2284
7	T3R1	0.198	0.1878
8	T3R1	0.212	0.2576
9	T3R1	0.203	0.2473
10	T1	0.197	0.2404
11	T1	0.119	0.1512
12	T1	0.125	0.1581

Fuente: Elaborado por Martínez, (2025).

En la tabla anterior se muestra la absorbancia obtenida de la primera evaluación de inoculación de las muestras de suelo con el hongo, así como la concentración de Cr

(VI) después de dos semanas de tratamiento por cada una de las cepas utilizadas, donde se puede identificar que la cepa T2R4 tuvo la mayor eficiencia de remoción.

Tabla 4.6- Absorbancia y concentración obtenida del riego de un mes con las cepas.

02/05/2025			
Muestra de suelo	Tipo de cepa	Absorbancia (nm)	Concentración (mg/L)
1	Testigo	0.093	0.1214
2	Testigo	0.062	0.0860
3	Testigo	0.016	0.0334
4	T2R4	0.109	0.1398
5	T2R4	0.114	0.1455
6	T2R4	0.122	0.1546
7	T3R1	0.126	0.1523
8	T3R1	0.165	0.1013
9	T3R1	0.177	0.1175
10	T1	0.035	0.0551
11	T1	0.024	0.0425
12	T1	0.084	0.1112

Fuente: Elaborado por Martínez, (2025).

En la tabla anterior se muestra la absorbancia obtenida de la segunda evaluación de inoculación de las muestras de suelo con el hongo, así como la concentración de Cr (VI) después de un mes de tratamiento por cada una de las cepas utilizadas, donde se puede identificar que la cepa T2R4 tuvo la mayor eficiencia de remoción al finalizar la micorremediación.

Para llevar a cabo las comparaciones correspondientes, se puede observar la tabla (4.7), la cual contiene los tipos de cepa que se utilizó, la concentración inicial de cromo antes de aplicar el tratamiento y la concentración final restante de Cr (VI) de cada una de las cepas utilizadas.

Tabla 4.7- Absorbancia, concentración inicial y final del Cr (VI).

Tipo de cepa	Concentración inicial en mg/L de Cr (VI)	Concentración final en mg/L de Cr (VI)
Testigo	0.4292	0.2384
T2R4	0.4292	0.0806
T3R1	0.4292	0.3045
T1	0.4292	0.1763

Fuente: Elaborado por Martínez, (2025).

En la tabla anterior se muestran las diferentes cepas utilizadas en la micorremediación, la concentración inicial de Cr (VI) identificada en la muestra de suelo de presa “La Alberca”, así como también la concentración final identificada al final del tratamiento donde se observa que las muestras de suelo inoculadas con la cepa T2R2 arrojaron la menor concentración del metal mencionado anteriormente, estos valores fueron generados por promedio.

Los resultados obtenidos muestran la concentración restante en porcentaje de Cr (VI) y los porcentajes de eficiencia de remoción de cada cepa utilizada (ver figura 4.7 y 4.8).

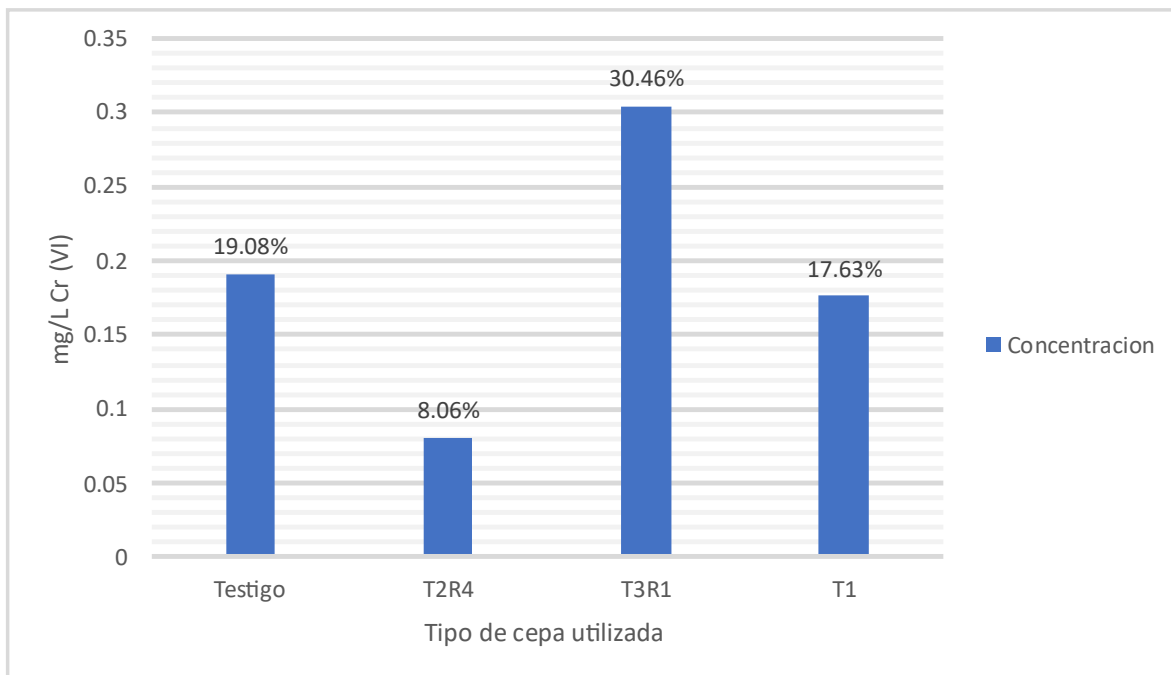


Figura 4.7 – Concentración de Cr (VI) restante (Realizado por Martínez, 2025).

La grafica anterior representa el porcentaje de Cr (VI) que quedo en las muestras de suelo al finalizar el proceso de micorremediación, donde el eje vertical representa la concentración final en mg/L, obtenida por promedio de cada cepa utilizada para este proceso y en el eje horizontal se indican las cepas que fueron utilizadas.

Los resultados arrojan que al finalizar el tratamiento, las muestras de suelo inoculadas con la cepa T2R4 fueron las que menor concentración de Cr (VI) quedo presente en ellas con un valor del 8.06 %, por el contrario las muestras que quedaron con mayor contaminación del metal mencionado anteriormente fueron las que se inocularon con la cepa T3R1, quedando en estas un 30.46 % de concentración de Cr (VI) sin remover.

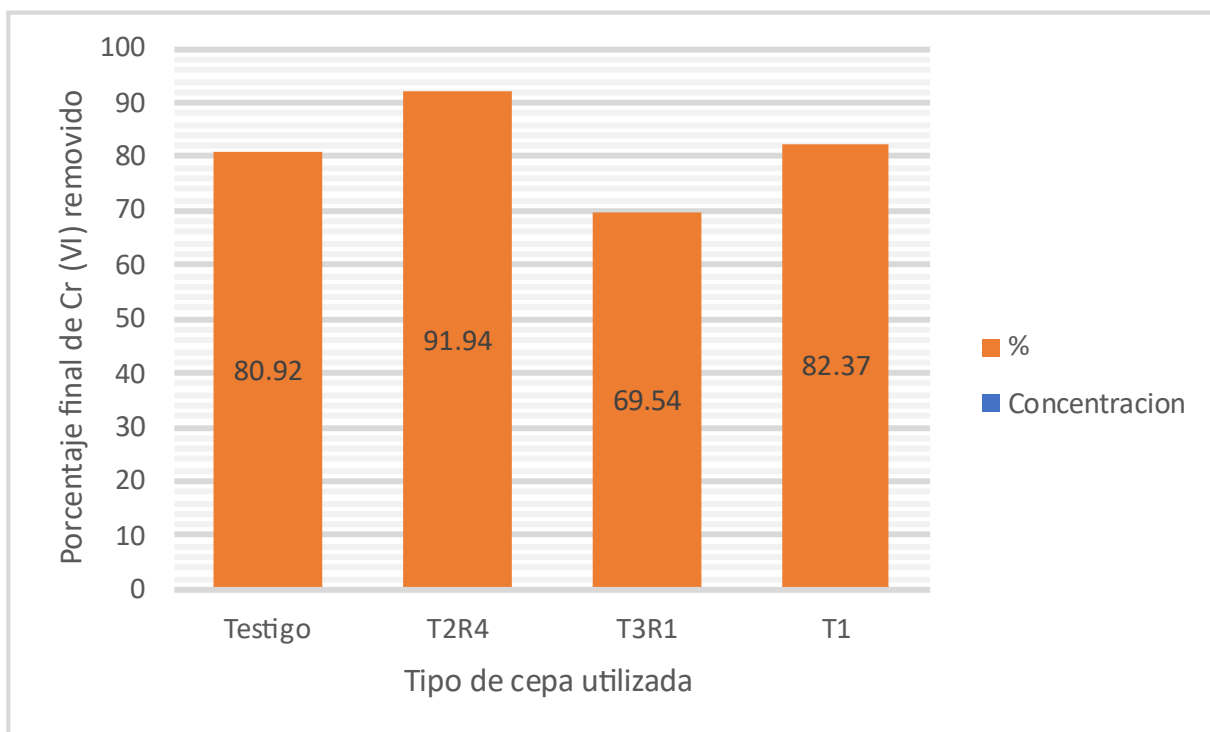


Figura 4.8 – Porcentaje de Cr (VI) eliminado por las cepas (Realizado por Martínez, 2025).

En la gráfica anterior se muestra el porcentaje de eficiencia de remoción de Cr (VI) de cada tipo de cepa, donde los valores verticales representan el porcentaje de 0 hasta 100 % y de manera horizontal se indica el nombre de las cepas que fueron utilizadas para el proceso de micorremediación.

Los resultados arrojados en esta gráfica señalan que la cepa T2R4 tuvo mayor eficiencia de remoción alcanzando un 91.94 %, mientras que la de menor eficiencia fue la cepa T3R1 con un 69.54 % de remoción.

De acuerdo con Suarez-Medina *et al* (2024), estos resultados se pueden deber a diversos factores, por ejemplo el hecho de que a pesar de que se trate de la misma especie de *Trichoderma*, algunas cepas tienen mayor capacidad de adaptarse o resistir a las condiciones a las que se somete su crecimiento, por ejemplo la solución que se utilizó para este proceso fue hecha a base de agua destilada, lo que puede indicar que T2R4 tenga mayor adaptabilidad a este solvente que T1, Testigo y T3R1. En otros casos esta variabilidad se puede deber a que algunas cepas no son *Trichoderma* pura sino un mutante (Cayotopa-Torres *et al.*, 2021).

CONCLUSIÓN

Se determinó que la micorremediación, utilizando cepas de *Trichoderma yunnanense*, es una técnica viable, eficaz y amigable con el medio ambiente para la remoción de Cr(VI) en el suelo de presa “La Alberca”. Esto fue posible a la alta cantidad de nutrientes con los que cuenta el suelo del sitio y a que este tipo de hongo tiene la capacidad de sobrevivir en sitios altamente contaminados por metales pesados.

Durante el proceso de micorremediación, *Trichoderma* tuvo la capacidad de interactuar con el Cr (VI) presente en las muestras de suelo y está con su liberación de compuestos orgánicos reductores, como ácidos orgánicos enzimas y metabolitos secundarios fue capaz de realizar una mineralización transformando el cromo hexavalente en cromo trivalente, lo cual disminuye la probabilidad de que se disuelva en el agua y además reduce su movilidad ya que alcanza un punto estable con la materia orgánica del suelo.

Entre las cepas evaluadas (Testigo, T2R4, T3R1 y T1), se encontró que la cepa T2R4 presentó el mayor rendimiento en términos de remoción del metal, alcanzando una eficiencia del 91.94 % a una concentración de 0.4292 mg/L, lo cual representa un resultado positivo dentro de los criterios establecidos por la normativa NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. La posible razón de este acontecimiento se debe a que *Trichoderma* T2R4 tuvo una mayor adaptabilidad a las condiciones que se le sometió durante el tratamiento de micorremediación y por lo tanto obtuvo un mayor rendimiento para remover la concentración de Cr (VI).

Por el contrario, la cepa que mostró el menor rendimiento de remoción fue la T3R1 con un porcentaje del 69.54 %, aunque esta cepa no cuenta con la misma resistencia al cromo, no por ello se descarta su posible uso, tal vez en suelos con concentraciones bajas de Cr (VI).

No significa que Testigo, T3R1, y T1 no sean capaces de llevar a cabo un proceso de micorremediación, sino que sería necesario realizar estudios para ver si utilizando medio de cultivo como soluto favorece su crecimiento en el suelo que sea

inoculado, así como también someterse a pruebas experimentales para saber si son mas resistentes a otro tipo de contaminante.

También se considera importante analizar sus características biológicas para descartar que no se trate de *Trichoderma* pura, es decir que exista alguna combinación con otro hongo o alguna alteración genética que haya ocasionado alguna mutación.

Se plantea como perspectivas de este proyecto, evaluar el comportamiento de estas cepas en condiciones de campo ya que este procedimiento se realizó en condiciones controladas de laboratorio. Se considera importante evaluar la eficiencia del hongo directamente en el suelo del sitio seleccionado, el ambiente permitiría validar su uso a escala real, considerando variables como el clima, la presencia de otros contaminantes, la microbiota nativa del suelo, y la variabilidad del pH y humedad.

Bibliografía

- Acevedo, A. (2015). Aplicación de lacasas producidas por hongos para degradación de colorantes microbiológicos (hematoxilina y azul de metileno). [Http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/2530](http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/2530)
- Agrícolas, B. (2024, 28 octubre). Los bioestimulantes en la biorremediación. Bioestimulantes Agrícolas. <https://www.bioestimulantesagricolas.net/los-bioestimulantes-en-la-biorremediacion/>
- Alvarado, R. (2025, 22 abril). Iniciarán reforzamiento del bordo de la Alberca de Tres Villas en Cuernavaca. El Sol de Irapuato | Noticias Locales, Policiacas, de México, Guanajuato y el Mundo. <https://oem.com.mx/elsoldeirapuato/local/iniciaran-reforzamiento-del-bordo-de-la-alberca-de-tres-villas-en-cuernavaca-22921791>
- Álvaro, C. P. (2017, 9 diciembre). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. [Http://www.scielo.org.co/](http://www.scielo.org.co/). Recuperado 5 de septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S1692-33242010000200004
- Ardavin, J. R., & García, J. A. (2016, 13 septiembre). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. [Www.gob.mx](http://www.gob.mx). Recuperado 3 de mayo de 2024, de <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-147-semarnat-ssa1-2004>
- Argumedo-Delira, R., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2018). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000400006
- Arriaga, M. (2023, 27 enero). Negligencia ambiental: 'Río Turbio' tiene 18 años contaminado por industria de León. *Periódico Correo*.

<https://www.periodicocorreo.com.mx/rio-turbio-tiene-18-anos-contaminado-por-industria-de-leon/>

Barrera, C. (2017, 14 julio). La soldadura de acero inoxidable produce cromo hexavalente. Www.plymovent.com. Recuperado 30 de abril de 2024, de <https://www.plymovent.com/es/visi%C3%B3n-general/noticias-y-art%C3%ADculos/la-soldadura-de-acero-inoxidable-produce-cromo-hexavalente>

Bautista, K. (2017, 27 febrero). El Río Turbio, un “gran drenaje” – Agua.org.mx. Agua.org.mx. <https://agua.org.mx/el-rio-turbio-un-gran-drenaje/>

Bermúdez Montes, D., & López Almanza, E. R. (2017). Evaluación de la factibilidad de un sistema de humedales para la disminución de cromo (vi). Jóvenes en la ciencia, 3(2), 325-327. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/>

Bernal, G. (26 de noviembre de 2014). La entidad, principal curtidora de pieles. Obtenido de Periódico correo: <https://periodicocorreo.com.mx/la-entidad-principal-curtidora-de-pieles/>

Bordino, J. (2021, 27 septiembre). Biorremediación: qué es, tipos y ejemplos. Ecologiaverde.com. <https://www.ecologiaverde.com/biorremediacion-que-es-tipos-y-ejemplos-3566.html>

Bravo, C. P., & Quispe, L. S. (2019). Metales pesados: fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. Ciencias, 2(1), 20-36. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>

Cabrera Moreira, S., Paneque Rondón, P., Pérez Olmo, C., & Plá Rodríguez, E. (2014). Métodos de estudio del estado físico de los suelos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(3), 39-44. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 3(17), 39-44. <https://www.redalyc.org/revista.oa?Id=932>

Cahuana, L., & Aduvire, O. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos

- ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 33. [Http://scielo.org.bo/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=s2519-53522019000200002](http://scielo.org.bo/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=s2519-53522019000200002)
- Cayotopa-Torres, J., Arévalo-López, L., Pichis-García, R., Olivera-Cayotopa, D., Rimachi-Valle, M., & Márquez-Dávila, K. (2021). New cadmium bioremediation agents: *Trichoderma* species native to the rhizosphere of cacao trees. *Scientia Agropecuaria*, 24(2), 155-160. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.017>
- Contreras, J. (2022, enero 19). Guanajuato, líder en producción de curtido de cuero y piel. *Líder Empresarial*. <https://www.liderempresarial.com/guanajuato-lider-en-produccion-de-curtido-de-cuero-y-piel/>
- Covarrubias, S. A., Berumen, J. A. G., & Cabriaes, J. J. P. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25(NE-3), 40-45. <https://doi.org/10.15174/au.2015.907>
- Cruz-Choappa, R., Amigo, F., & Goecke, A. (2022). El género *Trichoderma*. *Revista Chilena de Infectología*, 39(4), 499-500. <https://doi.org/10.4067/s0716-10182022000400499>
- Covarrubias, S. A., & Cabriaes, J. J. P. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(esp01), 7-21. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.esp01.01>
- Dickson, L. (2016, 23 noviembre). Efectos del cromo en el medio ambiente y en la salud. *Elinsignia.com*. Recuperado 21 de abril de 2024, de <https://elinsignia.com/2016/11/23/efectos-del-cromo-medio-ambiente-la-salud/>
- Dinakarkumar, Y., Ramakrishnan, G., Gujjula, K. R., Vasu, V., Balamurugan, P., & Murali, G. (2024). Fungal bioremediation: An overview of the mechanisms,

- applications and future perspectives. *Environmental Chemistry And Ecotoxicology*, 6, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.07.002>
- Franco, L. F. L., Muñoz, P. T. L., & García, F. G. M. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología En el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Fuentes, G. (2023, mayo 31). Cómo contamina el cromo al medio ambiente. *Mundo Sustentable*. https://mundosustentable.com.mx/como-contamina-el-cromo-al-medio-ambiente/?Expand_article=1
- García, C. (2014, enero 3). En Guanajuato, 22 puntos críticos de contaminación. *Vía Orgánica*. <https://viaorganica.org/en-guanajuato-22-puntos-criticos-de-contaminacion/>
- Garibaldi, S. (2019, 24 octubre). Contaminación de presa en Tres Villas, Cuerámaro; apuestan por saneamiento del agua. *Periódico Notus*. <https://notus.com.mx/contaminacion-de-presa-en-tres-villas-cueramaro-apuestan-por-saneamiento-del-agua/>
- Gélvez L. (2015, 19 febrero). El Cromo en la nutrición del animal - Microminerales en nutrición animal. *Mundo-pecuario.com*. Recuperado 3 de mayo de 2024, de https://mundo-pecuario.com/tema69/microminerales_nutricion_animal/cromo-443.html
- González, C. (2019). Remediación in situ offside mediante *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* para la remoción de Cr VI [Tesis de licenciatura]. Instituto Tecnológico Superior de Abasolo.
- González, J. A. R., Zamora, D. T., & Márquez, G. G. (2020). Estrategias empresariales ante la COVID-19: el caso de la industria curtidora de León, Guanajuato. <https://www.redalyc.org/journal/4576/457662386033/movil/#:~:text=De%20>

[acuerdo%20con%20el%20Directorio,Le%C3%b3n%2C%20constituyendo%2071%20%25%20del%20total](#)

Godínez, H. (2024, 15 enero). Cromo Hexavalente en Aguas Residuales: Un Peligro Silente en Nuestros Sistemas de Desagüe | Instituto del Agua. Instituto del Agua. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/cromo-hexavalente-en-aguas-residuales/#:~:text=La%20presencia%20de%20cromo%20hexavalente%20en%20el%20agua,la%20flora%20y%20fauna%20que%20viven%20en%20ellos>.

Greenforest Tienda Forestal. (2025, 14 mayo). Barreno Para Suelo Ams, Acero Inoxidable, 7/8" x 33" - greenforest Tienda Forestal. <https://greenforest.com.co/producto/barreno-para-suelos-estandar-ams-acero-inoxidable-7-8-x-33/>

Hanna Instruments. (2025, 11 junio). Backpack labtm test kit de calidad de suelo para medicion de: nitrogeno, fosforo, potasio y ph.. <https://cocisa.mx/products/hi3896bp>

Hernández-Silva, G., Solorio-Munguía, J. G., Maples-vermeersch, M., Vassallo-Morales, L., Flores-Delgadillo, L., Hernández-Santiago, D., Solís-Valdez, S., Hernández-Anguiano, M. E., & Alcalá-Martínez, J. R. (2005). Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el río Lerma, Estado de Guanajuato, México. <https://boletin.geologia.unam.mx/index.php/boletin/article/view/1>

Lazarte Lovatón, R. (2023). Micorremediación con hongos de pudrición blanca, mediante análisis de expresión de lacasas por aproximación proteómica diferencial para el tratamiento de aguas residuales de la industria peletera, Arequipa, 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.12773/16659>

López, J. (2025, 16 marzo). Hongos como agentes de control biológico: una alternativa sostenible. Todo Micología.

<https://todomicologia.com/ecologia/hongos-como-agentes-de-control-biologico-una-alternativa-sostenible/>

Martínez, V. H. (2018). Aislamiento y caracterización de bacterias con posible potencial reductor de cromo (VI) [Tesis de Licenciatura]. Instituto Tecnológico Superior de Abasolo.

Minera, S. (2017, 12 diciembre). Biorremediación: técnicas empleadas para la recuperación de suelos. Revista Seguridad Minera. <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/biorremediacion-y-tipos-de-tecnicas-para-recuperar-los-suelos/>

Morales, V. B. (2022). Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales a partir de tratamientos electroquímicos en la empresa Tenería Núñez [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34284>

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2021). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Www.scielo.org.co*, 14(27). <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>

Pochteca Perú. (2025, 15 abril). Precipitado de metales como método de reducción de emisiones al MA. Pochteca Perú | Venta de materias primas para la Industria. <https://peru.pochteca.net/precipitado-de-metales-para-reducir-emisiones/>

Quero-Jiménez, P. C., Margie, Z. V., Sergio, M. F., La Torre Jorge, D., Acosta, I., Ángel, M. T., Quero-Jiménez, P. C., Margie, Z. V., Sergio, M. F., La Torre Jorge, D., Acosta, I., & Ángel, M. T. (2019, 1 junio). Determinación de microelementos y minerales traza en suelos aledaños a la empresa electroquímica de sagua, cuba. Recuperado 30 de julio de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S2223-48612019000200079

- Quintanar, R. (2020, 7 mayo). Calculan tenerías pérdidas superiores a 240 MDP. Grupo Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/leon-calculan-tenerias-perdidas-superiores-240-mdp>
- Rattix Motors S.L. (2023, 26 julio). ¿Qué es el Cromo Hexavalente y por qué lo prohíbe la UE? - Rattix. Rattix. <https://www.rattix.es/blog/lo-que-dice-la-ley/cromo-hexavalente-y-ue>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jiménez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16(2), 66-77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?Codigo=6096110>
- Ricaurte, P., & Núñez, M. (2016). Implementación de un bombo de acabados del cuero para el estudio del proceso de Recurtido y Tinte de cueros de especies menores para el Laboratorio de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/1876>
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados [Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.]. http://scielo.sld.cu/scielo.php?Pid=s102930192017001200012&script=sci_arttext
- Romero, M., Garcia, E., Castro, J. I., & López, E. (2023). Electrofitorremediación: remediación híbrida ex situ para la remoción de cromo hexavalente mediante *Solanum elaeagnifolium* Cav. Y la aplicación de un campo eléctrico. Revista Internacional de Investigación E Innovación Tecnológica, 11(62). <https://www.researchgate.net/publication/370594295>
- Sabaté, M. V. (2022, marzo 17). Daños a la Salud por la Exposición a Cromo y sus Compuestos. Quirónprevención. <https://www.quironprevencion.com/blogs/es/prevenidos/danos-salud-exposicion-cromo-compuestos>

Sánchez, M. (2019, 25 septiembre). ¿Cuáles son las características del suelo franco? Jardineria On. https://www.jardineriaon.com/suelo-franco.html#google_vignette

Secretaría de Economía. (2017, 6 marzo). DECLARATORIA de vigencia de la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016. Www.dof.gob.mx. Recuperado 4 de junio de 2025, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?Codigo=5475373&fecha=06/03/2017#gsc.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 11 marzo). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Www.dof.gob.mx. Recuperado 4 de junio de 2025, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?Codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023, 15 diciembre). NMX-AA-016-1984. Normalización. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-aa-016-1984/>

SEMARNAT. (2007, 2 marzo). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Www.diariooficial.gob.mx. Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://www.diariooficial.gob.mx/normasoficiales.php?Codp=1858&view=si#gsc.tab=0>

Sepúlveda, J. A. M., Yáñez, J. M. S., Sepúlveda, T. V., Quintero, V. E. V., Junco, L. M. P., Bautista, P. A. D., Umbacía, M., Márquez-Benavides, L., Camacho, J. V., García, L. F. C., & Casallas, M. R. (2019). Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio. En Universidad EAN ebooks. <https://doi.org/10.21158/9789587566116>

- Silva, M. J., & Morales, D. S. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1), 69-80. <https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- Sivila, N., & Álvarez, S. (2013). Producción artesanal de *Trichoderma*. Studocu. Recuperado 20 de junio de 2025, de <https://www.studocu.com/co/document/servicio-nacional-de-aprendizaje/salud-ocupacional/manual-de-trichoderma-2013-sivila-alvarez/50735469>
- Suarez Medina, L., Murcia-Torrejano, V., Rivas López, M., Pinto Antonio, A., Nikol Muñoz Otero, A., Valencia-Payán, J., Ochoa, W., & Moreno-Ortega, D. (2024). Metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp.: importancia en la industria agrícola, farmacéutica y alimentaria. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 10(3), 35-55. ISSN: 2422-0493.
- Tamargo, A. (2022, 18 febrero). Metales pesados y sus efectos en la salud humana - AGQ Labs México. AGQ Labs México. <https://agqlabs.mx/2021/01/05/metales-pesados-efectos-salud-humana/>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109-123. http://www.scielo.org.co/scielo.php?Pid=S012377992015000100010&script=sci_arttext
- Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2014). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de quimsacocha al sur del Ecuador. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*, 42(2), 138-153. https://www.researchgate.net/profile/rolandocelleri/publication/260389572_EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO PARAMO DE QUIMSACOCOA AL SUR DEL ECUAD

[OR/links/0c960530f58b68c3df000000/EFFECTOS-SOBRE-LAS-PROPIEDADES-FISICAS-Y-QUIMICAS-DE-LOS-SUELOS-POR-EL-CAMBIO-DE-LA-COBERTURA-VEGETAL-Y-USO-DEL-SUELO-PARAMO-DE-QUIMSACOA-AL-SUR-DEL-ECUADOR.pdf](https://www.researchgate.net/publication/321454000/EFFECTOS-SOBRE-LAS-PROPIEDADES-FISICAS-Y-QUIMICAS-DE-LOS-SUELOS-POR-EL-CAMBIO-DE-LA-COBERTURA-VEGETAL-Y-USO-DEL-SUELO-PARAMO-DE-QUIMSACOA-AL-SUR-DEL-ECUADOR)

Trinidad, M. J. (23 de octubre de 2016). Am. Recuperado el 14 de marzo de 2018, de <https://www.am.com.mx/2016/10/22/leon/local/van-sapal-contratenerias321454>

Troya, C., & Vaca, L. (2014, mayo). <https://agricultura.gob.ec/wp-content/uploads/2016/01/MANUAL-labos-para-web.pdf>. Agricultura.gob.ec. Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://agricultura.gob.ec/wp-content/uploads/2016/01/MANUAL-labos-para-web.pdf>

Zúñiga Chacón, C. (2021). Electrobioestimulación de suelo industrial contaminado con Cr (VI). [Tesis de Licenciatura]. Instituto Tecnológico Superior De Abasolo.

Zúñiga Chacón, C., García Zúñiga, M. E., Zanella, I., & López Almanza, E. R. (2022). Electrobioestimulación ex situ - off side de suelo industrial contaminado con cromo hexavalente / Electrobiostimulation ex situ - off side of industrial soil contaminated with hexavalent chromium. Revista de Investigación Aplicada En Ingeniería UPB/uptap, 7(1), 25-30. https://www.researchgate.net/profile/Erick-Lopez-7/publication/371069738_Electrobioestimulacion_ex_situ_-_off_side_de_suelo_industrial_contaminado_con_cromo_hexavalente_Electrobiostimulation_ex_situ_-_off_side_of_industrial_soil_contaminated_with_hexavalent_chromium/links/6470ce9da25e543829ced98e/Electrobioestimulacion-ex-situ-off-side-de-suelo-industrial-contaminado-con-cromo-hexavalente-Electrobiostimulation-ex-situ-off-side-of-industrial-soil-contaminated-with-hexavalent-chromium.pdf