

# Instituto Tecnológico Superior de Abasolo

Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Guanajuato.



## **Remediación *in situ* offside mediante *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* para la remoción de Cr VI**

Tesis profesional que para obtener el título de:  
**Ingeniero Ambiental**

Presenta:

**Cynthia González González**

Asesor:

M. en E. IBQ. Erick Rodolfo López Almanza

ABASOLO, GTO.

MAYO DE 2019



## Constancia de Revisión Y Aprobación de Tesis

La tesis **Remediación *in situ* offside mediante *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* para la remoción de Cr VI** presentada para obtener el Grado de Ingeniero Ambiental elaborada por **Cynthia González González** con numero de control **AS14110076** y aprobada el **23 de mayo del 2019** por su director de tesis y los miembros del Comité Tutorial designado y aprobado por la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico Superior de Abasolo.

\_\_\_\_\_  
M. en E. IBQ Erick Rodolfo López Almanza  
Director de la tesis

\_\_\_\_\_  
Dr. Carlos Alberto González Razo  
Miembro del Comité Tutorial

\_\_\_\_\_  
Dr. Cesar Álvarez Mejía  
Miembro del Comité Tutorial

## **Dedicatorias**

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta aquí y haberme dado la salud y fortaleza para lograr mis objetivos y nunca desistir.

A mis padres.

Por apoyarme incondicionalmente en todo momento, por sus consejos, por la motivación constante y porque gracias a ellos soy quien soy ahora.

## **Agradecimientos**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por darme fortaleza, y llenarme de aprendizajes.

Agradezco al Instituto Tecnológico Superior de Abasolo por formarme como una persona éticamente profesional, responsable y de valores. Así como a todos mis profesores que formaron parte de mi formación como ingeniero y por transmitirme sus conocimientos.

A mi asesor de tesis el M. en E. IBQ. Erick Rodolfo López Almanza, por el apoyo que me brindó, su tiempo y dedicación para que este proyecto se llevara a cabo.

A mis compañeras y amigas Areli Aviles Martínez y Nayellie Luciano Franco, que nos apoyamos a lo largo de la carrera. Reímos, lloramos y aprendimos juntas, y a pesar de todo nunca nos dimos por vencidas.

Gracias a mis padres y hermanas, que fueron mi motivación para siempre seguir adelante y no darme por vencida. Por confiar en mí y apoyarme en todo momento, por ser mi inspiración todos los días.

¡Gracias!

## Resumen

Actualmente los problemas de contaminación de agua con metales pesados como el Cr (VI) han crecido debido al aumento de las industrias que no les dan un tratamiento a sus aguas residuales, por ello, este proyecto tuvo como objetivo realizar un proceso de fitorremediación utilizando *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* mediante la técnica *in situ offside*. El proyecto se realizó en la Maquiladora Textil Puerta de Palo Dulce, Abasolo, Guanajuato. Se eligió esta empresa ya que es una empresa que utiliza grandes cantidades de agua en sus procesos y no les dan un tratamiento a sus aguas residuales antes de descargarlas, además, al realizar la toma de muestra y analizar la concentración de Cr (VI) se obtuvo una concentración inicial de 1.61 ppm, lo que indica que está por encima del límite máximo permisible de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, esta norma señala un límite máximo permisible de 0.5 ppm. Después de realizar el muestreo y análisis de agua residual, se implementó un sistema de contención, para retener el agua a tratar y llevar a cabo el proceso de fitorremediación, el sistema se realizó debido a que no se puede incorporar *Salvinia natans* directamente al sitio de descarga ya que no es una planta nativa del sitio y puede generar un desequilibrio ecológico. El sistema contaba con un diámetro de 1 metro, 1.5 metros de profundidad, y aproximadamente 500 litros de agua, se le colocaron hules de 3x4m para evitar que el agua se filtrara y poder llevar a cabo la fitorremediación, se estableció cerca del sitio de descarga de agua residual. El proceso se llevó a cabo durante tres meses, durante los cuales, se estuvo dando cuidados a las plantas mediante la adición de nutrientes para su desarrollo aproximadamente cada 3 días, así como la eliminación periódica del crecimiento de maleza cerca del sistema para permitir la entrada de los rayos del sol. Se colocaron aproximadamente 100 plantas de *Salvinia natans* en el sistema y aproximadamente 50 gr de *Trichoderma*, el cual se agregó en forma de polvo. Durante el proceso se realizaron varios análisis de determinación de Cr (VI) en base a la NMX-AA-044-SCFI-2001 para determinar la remoción de Cr (VI), así como análisis de algunos parámetros del agua como cloro, nitritos, nitratos y DBO. Durante el periodo del proceso se realizaron 6 análisis para determinar la remoción de Cr (VI) y su porcentaje de remoción entre cada análisis, con una concentración inicial de 1.61 ppm, en el segundo análisis 1.51 ppm con un 6.40% de remoción, en el tercer análisis 0.87 ppm con un 41.93% de remoción, en el cuarto análisis 0.68 ppm con un 21.94% de remoción, en el quinto análisis 0.4864 ppm con una remoción de 28.95% y el último análisis con una concentración final de 0.37 ppm y una remoción total de 76.59%. De acuerdo a esto, se comprobó

que *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* tiene la capacidad de acumular y remover Cr (VI) presente en agua mediante la técnica de fitorremediación *in situ offside*, lo que demuestra que este proceso es una buena alternativa para la eliminación de Cr (VI). Se realizó un segundo sistema al cual se le incorporó *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana*, para ver la efectividad de remoción de Cr (VI) con ambas plantas trabajando en conjunto. Igualmente se llevó a cabo por 3 meses y se realizaron 6 análisis para determinar la remoción de Cr (VI), con una concentración inicial de 2.59 ppm y una concentración final de 0.69 ppm. Al finalizar el proceso y determinar la concentración final de Cr (VI), se comprobó que *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana* tienen la capacidad de remover Cr (VI) presente en agua, con un 73.19% de remoción, lo que indica que ambas plantas en conjunto son una buena alternativa para la eliminación de Cr (VI). Se concluye que utilizar *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* tuvo un mayor porcentaje de remoción de Cr (VI) que utilizar *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana*, debido a que la concentración inicial de Cr (VI) fue mayor que el sistema 1 que contenía *Salvinia natans* y *Trichoderma*. Se considera que el proceso de fitorremediación *in situ offside* para la remoción de Cr (VI) utilizando *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* es una técnica factible para utilizarse en la Maquiladora Textil Puerta de Palo Dulce, ya que no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales y esta técnica es barata, sustentable y de fácil mantenimiento. Se considera una buena técnica para implementarse en industrias que utilizan Cr (VI) en sus procesos y descargan sus aguas residuales contaminadas con este metal.

## Abstract

Currently the problems of water contamination with heavy metals such as Cr (VI) have grown due to the increase of industries that do not treat their wastewater, therefore, this project aimed to perform a process of phytoremediation using *Salvinia natans* in interaction with *Trichoderma* by *on-site* technique *off site*. The project was carried out at the Puerta de Palo Dulce Textile Maquiladora, Abasolo, Guanajuato. This company was chosen because it is a company that uses large amounts of water in its processes and does not treat its wastewater before discharging it, and, when taking the sample and analyzing the concentration of Cr (VI) obtained an initial concentration of 1.61 ppm, which indicates that it is above the maximum permissible limit according to NOM-001-SEMARNAT-1996, which establishes the maximum permissible limits of pollutants in wastewater discharges in national waters and goods, this standard indicates a maximum permissible limit of 0.5 ppm. After carrying out the sampling and analysis of residual water, a containment system was implemented, to retain the water to be treated and carry out the phytoremediation process, the system was carried out because *Salvinia natans* cannot be directly incorporated into the discharge site, since it is not a plant native to the site and can generate an ecological imbalance. The system had a diameter of 1 meter, 1.5 meters deep, and approximately 500 liters of water, 3x4m rubbers were placed to prevent the water from leaking and being able to carry out the phytoremediation, it was established near the discharge site of residual water. The process was carried out during three months, during which care was given to the plants by adding nutrients for their development approximately every 3 days, as well as the periodic elimination of the growth of weeds near the system to allow the entry of the sun's rays. Approximately 100 *Salvinia natans* plants were placed in the system and approximately 50 grams of *Trichoderma*, which was added in powder form. During the process several analyzes were carried out to determine Cr (VI) based on the NMX-AA-044-SCFI-2001 to determine the removal of Cr (VI), as well as analysis of some water parameters such as chlorine, nitrites, nitrates and BOD. During the period of the process 6 analyzes were carried out to determine the removal of Cr (VI) and its percentage of removal between each analysis, with an initial concentration of 1.61 ppm, in the second analysis 1.51 ppm with a 6.40% removal, in the third analysis 0.87 ppm with a 41.93% removal, in the fourth analysis 0.68 ppm with a 21.94% removal, in the fifth analysis 0.4864 ppm with a removal of 28.95% and the last analysis with a final concentration of 0.37 ppm and a removal total of 76.59%. Accordingly, it was found that *Salvinia natans* in interaction with *Trichoderma* has the capacity to accumulate and remove Cr (VI) present in water by means of the offside in situ phytoremediation technique, which shows that this process is a good alternative for elimination of Cr (VI). A second

system was carried out to which *Salvinia natans*, *Trichoderma* and *Azolla caroliniana* were incorporated, to see the effectiveness of Cr (VI) removal with both plants working together. It was also carried out for 3 months and 6 analyzes were performed to determine the removal of Cr (VI), with an initial concentration of 2.59 ppm and a final concentration of 0.69 ppm. At the end of the process and determine the final concentration of Cr (VI), it was found that *Salvinia natans*, *Trichoderma* and *Azolla caroliniana* have the capacity to remove Cr (VI) present in water, with a 73.19% removal, which indicates that both plants as a whole are a good alternative for the elimination of Cr (VI). It is concluded that using *Salvinia natans* in interaction with *Trichoderma* had a higher percentage of Cr (VI) removal than using *Salvinia natans*, *Trichoderma* and *Azolla caroliniana*, because the initial concentration of Cr (VI) was higher than the system 1 that contained *Salvinia natans* and *Trichoderma*. It is considered that the offside in situ phytoremediation process for the removal of Cr (VI) using *Salvinia natans* in interaction with *Trichoderma* is a feasible technique to be used in the Puerta de Palo Dulce Textile Maquiladora, since they do not have a treatment system for wastewater and this technique is cheap, sustainable and easy to maintain. It is considered a good technique to be implemented in industries that use Cr (VI) in their processes and discharge their wastewater contaminated with this metal.

## Contenido

Introducción.....	1
<b>Capítulo I Antecedentes .....</b>	<b>3</b>
1.1 Cromo.....	4
1.1.1 Contaminación con cromo por las industrias .....	4
1.1.2 Toxicidad del cromo.....	4
1.2 Normatividad .....	5
1.2.1 NOM-001-SEMARNAT-1996 .....	5
1.2.2 NOM-002-SEMARNAT-1996 .....	5
1.2.3. NOM-003-SEMARNAT-1997 .....	5
1.3 Tratamientos químicos para la remoción de metales pesados.....	6
1.4 Biotecnologías .....	6
1.4.1 Fitorremediación .....	6
1.4.1.1 Fitoestabilización.....	7
1.4.1.2 Fitoextracción .....	7
1.4.1.3 Fitovolatilización .....	7
1.4.1.4 Rizofiltración.....	7
1.4.1.5 Fitodegradación.....	8
1.4.2 Procesos <i>in situ</i> de fitorremediación .....	8
1.5 Macrófitas flotantes .....	9
1.5.1 <i>Salvinia natans</i> .....	10
1.5.1.1 Características .....	11
1.5.1.2 <i>Salvinia natans</i> y metales pesados .....	12
1.6 Interacción entre metales y microorganismos .....	12
1.6.1 Bioacumulación .....	13
1.6.2 Biosorción .....	13
1.6.3 Biomineralización.....	14
1.6.4 Quimiosorción .....	14
1.6.5 Biotransformación .....	14
1. 7 <i>Trichoderma</i> .....	14
1.7.1 Condiciones óptimas de crecimiento .....	15
1.7.2. Mecanismos de acción .....	15
1.7.2.1 Microparasitismo .....	15
1.7.2.2 Antibiosis.....	16
1.7.2.3 Competencia .....	16

1.7.3 Biorremediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos .....	16
1.7.4 Biorremediación de metales pesados .....	16
1.7.5 Relación simbiótica con plantas.....	17
1.8 Antecedentes de <i>Salvinia natans</i> en interacción con <i>Trichoderma</i> para remoción de Cr (VI) .....	18
<b>Capítulo II Generalidades del proyecto .....</b>	<b>19</b>
2.1 Planteamiento del problema.....	20
2.2 Justificación.....	20
2.3 Objetivos .....	21
2.3.1 Objetivo General.....	21
2.3.2 Objetivos Específicos.....	21
2.4 Hipótesis.....	21
<b>Capítulo III Materiales y métodos.....</b>	<b>22</b>
3.1 Muestreo de agua residual en la comunidad de Puerta de Palo Dulce Abasolo, Gto., en base a la NMX-AA-003-1980.....	23
3.1.1 Materiales .....	23
3.1.2 Metodología .....	23
3.2 Determinación de Cromo (VI) en base a la NMX- AA-044-SCFI-2014.....	24
3.2.1 Materiales y reactivos .....	24
3.2.2 Metodología .....	25
3.2.2.1 Preparación de las disoluciones.....	25
3.2.2.2 Análisis de Cr (VI) .....	25
3.3 Análisis de parámetros del agua .....	26
3.3.1 Análisis para determinar sólidos sedimentables en base a la NMX- AA- 004-SCFI-2019 .....	26
3.3.1.1 Materiales.....	26
3.3.1.2 Metodología .....	26
3.3.2 Análisis para determinar cloro .....	27
3.3.2.1 Materiales y reactivos.....	27
3.3.2.2 Metodología .....	27
3.3.3 Medición del pH en base a la NMX-AA-008-SCFI-2016 .....	28
3.3.3.1 Materiales y equipos .....	28
3.3.3.2 Metodología .....	28
3.3.4 Análisis de nitratos.....	28
3.3.4.1 Materiales y reactivos.....	29

3.3.4.2 Metodología .....	29
3.3.5 Análisis de nitritos .....	29
3.3.5.1 Materiales y reactivos.....	30
3.3.5.2 Metodología .....	30
3.4 Adecuación del sitio .....	30
3.5 Implementación de sistemas .....	32
3.6 Monitoreo y mantenimiento .....	35
3.7 Incineración de la planta.....	35
<b>Capítulo IV Resultados y discusión.....</b>	<b>36</b>
4.1 Ubicación del sistema .....	37
4.2 Análisis de la determinación de Cr (VI) en muestra de agua.....	37
4.2.1 Primer análisis de Cr (VI).....	37
4.2.2 Segundo analisis de Cr (VI) .....	39
4.2.3 Tercer análisis de Cr (VI) .....	40
4.2.4 Cuarto análisis de Cr (VI).....	41
4.2.5 Quinto análisis de Cr (VI).....	43
4.2.6 Sexto análisis de Cr (VI) .....	44
4.2.7 Remoción total de Cr (VI) .....	46
4.3 Análisis de parámetros del agua .....	46
4.4 Resultados de análisis de agua del sistema 2.....	47
4.4.1 Análisis de remoción de Cr (VI) .....	47
4.4.2 Análisis de parámetros del agua.....	48
<b>Conclusiones.....</b>	<b>49</b>
Anexos .....	51
Bibliografías.....	56

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> .....	9
Tabla 1.2 Taxonomía de <i>Salvinia natans</i> .....	11
Tabla 1.3 Taxonomía de <i>Trichoderma</i> .....	14
Tabla 4.1 Absorbancias del primer análisis.....	38
Tabla 4.2 Absorbancias del segundo análisis.....	39
Tabla 4.3 Absorbancias del tercer análisis.....	40
Tabla 4.4 Absorbancias del cuarto análisis.....	42
Tabla 4.5 Absorbancias del quinto análisis.....	43
Tabla 4.6 Absorbancias del sexto análisis.....	44
Tabla 4.7 Concentraciones de Cr (VI) y límite máximo permisible.....	46
Tabla 4.8 Resultados de análisis de parámetros del agua.....	47
Tabla 4.9 Concentraciones de Cr (VI) y porcentajes de remoción entre cada análisis.....	47
Tabla 4.10 Resultados de análisis de parámetros del agua del sistema 2.....	48

## Índice de figuras

Figura 1.1 Procesos de fitorremediación.....	8
Figura 1.2 Fotografía de <i>Salvinia natans</i> .....	10
Figura 1.3 Mecanismos de interacción entre metales y microorganismos.....	13
Figura 1.4 Fotografía de <i>Trichoderma spp.</i> .....	15
Figura 3.1 Limpieza del sitio.....	31
Figura 3.2 Antes de la limpieza del sitio.....	31
Figura 3.3 Después de la limpieza del sitio.....	31
Figura 3.4 Instalación del tejado.....	32
Figura 3.5 Fotografía del sistema antes de la incorporación de <i>Salvinia natans</i> y <i>Trichoderma</i> , y <i>Salvinia natans</i> , <i>Trichoderma</i> y <i>Azolla caroliniana</i> .....	33
Figura 3.6 Incorporación de <i>Salvinia natans</i> y <i>Trichoderma</i> al sistema.....	34
Figura 3.7 Incorporación de <i>Salvinia natans</i> , <i>Trichoderma</i> y <i>Azolla caroliniana</i> al sistema 2.....	34
Figura 3.8 Cercado del sistema.....	35
Figura 3.9 Incineración de <i>Salvinia natans</i> .....	35
Figura 4.1 Ubicación de la Maquiladora Textil Puerta de Palo Dulce Abasolo.....	37
Figura 4.2 Variación de la concentración de Cr (VI) del sistema 1.....	46
Figura 4.3 Variación de la concentración de Cr (VI) del sistema 2.....	48

## Introducción

El agua es uno de los elementos naturales que se encuentra en mayor cantidad en la tierra, y su contaminación por metales pesados es uno de los principales problemas en México. Esto se debe al gran número de industrias que la utilizan en sus procesos y la descargan sin antes darle un tratamiento, como es el caso de las industrias textiles.

Existen tratamientos químicos para la remoción de metales pesados en el agua, pero poseen la desventaja de tener elevados costos en sus procesos. Por esta razón se han desarrollado tecnologías alternativas que sean amigables con el medio ambiente y de bajo costo, un ejemplo es la fitorremediación.

Esta investigación tuvo como finalidad llevar a cabo un proceso de fitorremediación *in situ* utilizando *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* para la remoción de Cr (VI) en un sitio contaminado con este metal.

El capítulo I aborda lo referente a la contaminación y toxicidad del Cr (VI), tratamientos químicos para la remoción de metales pesados, la fitorremediación y los procesos derivados de ella. Se describe también *Salvinia natans*, sus características y la capacidad que tiene de acumular metales pesados, así como la descripción de *Trichoderma*, sus mecanismos de acción y su relación simbiótica con las plantas. Por último, en este capítulo se hace mención de los antecedentes de este proyecto.

En el capítulo II se muestran las generalidades del proyecto, donde se presenta los objetivos planteados para este proyecto, el planteamiento del problema, el cual señala que existen diversas industrias que utilizan el Cr (VI) en sus procesos y no le dan un tratamiento al agua residual antes de descargarla y por lo tanto es necesario buscar alternativas sustentables como la fitorremediación, tal y como se menciona en la justificación, por último se muestra la hipótesis planteada para esta investigación.

En el capítulo III se hace mención a metodología que se realizó para llevar a cabo este proyecto; los análisis realizados en laboratorio de Cr (VI) y análisis de nitritos, nitratos, cloro y sólidos sedimentables, la implementación del sistema de contención, su adecuación y mantenimiento. Así como la mención de un segundo sistema de contención el cual contenía *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla*

*caroliniana*, para ver la efectividad de remoción de Cr (VI) con ambas plantas trabajando en conjunto.

En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos de los 6 análisis realizados para determinación de Cr (VI), con su respectivo porcentaje de remoción, así como tablas mostrando las absorbancias de cada análisis y los cálculos realizados para obtener las concentraciones. En este capítulo también se incluyen los resultados obtenidos de los análisis de parámetros del agua, los cuales se presentan en tablas. Por último, se presenta el capítulo de las conclusiones llegadas a finalizar este proyecto.

# **Capítulo I**

## **Antecedentes**

## 1.1 Cromo

El cromo es un elemento químico del grupo 6 de la tabla periódica con símbolo Cr y un número atómico de 24, su masa atómica es 51,996; punto de fusión de 1.857 °C; punto de ebullición de 2.672 °C; y su densidad de 7.2 g/cm<sup>3</sup> (Franco, 2011).

El cromo puede formar distintos compuestos dependiendo de su estado de oxidación; normalmente en aplicaciones comerciales se utiliza el cromo en estado VI, y en algunos casos en estado III. El Cr (VI) es el más utilizado en las industrias gracias a sus propiedades ácidas y oxidantes y a su capacidad de formar sales coloreadas e insolubles. Los compuestos derivados del Cr (VI) más importantes son el dicromato sódico, el dicromato de potasio y el trióxido de cromo (Nordberg, 2011).

### 1.1.1 Contaminación con cromo por las industrias

El aire y el agua se contaminan con Cr (VI) gracias a las actividades humanas e industriales. La contaminación de agua con este metal ocurre en las descargas de aguas residuales de industrias dedicadas, por ejemplo, a la manufactura de colorantes, a la curtiduría y el cromado.

Las industrias curtidoras generan descargas de aguas residuales con grandes concentraciones de cromo, el cual es usado como agente de curtido. La problemática radica en el uso de sales de cromo en el curtido de pieles, y que una gran cantidad no se fija y se libera al ambiente mediante las descargas de aguas residuales (Cobos, Londoño, & Garcia, 2008).

El incremento de las industrias ha causado también una elevación en los niveles de contaminación. En la industria textil, se generan una gran cantidad de sustancias químicas que no se fijan en las fibras textiles después del proceso de teñido.

### 1.1.2 Toxicidad del cromo

Los efectos biológicos del cromo dependerán de su estado de oxidación, el cromo (III) es aceptado por mamíferos como un oligoelemento y solo es nocivo en dosis excesivas, mientras que el cromo (VI) es considerado tóxico debido a que atraviesa fácilmente las membranas biológicas y puede ser transportado al interior de las células (Corona, 2010) (García, *et al.*, 2008).

El contacto de la piel con compuestos de cromo (VI) puede causar ulceraciones de esta. Si son absorbidos mediante inhalación, causan irritación de la nariz, hemorragias nasales, úlceras y perforaciones en el tabique nasal. Al ser ingerido puede provocar malestar estomacal, úlceras, daño en el hígado, riñón y hasta la muerte (Mejía, 2008).

## **1.2 Normatividad**

En México existen tres normas oficiales mexicanas que señalan los límites máximos permisibles en materia de aguas residuales de acuerdo a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las cuales se describen a continuación (SEMARNAT, 2012).

### **1.2.1 NOM-001-SEMARNAT-1996**

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. En esta norma se señalan las especificaciones a considerar para determinar la contaminación de diferentes contaminantes como metales pesados, patógenos como coliformes fecales y patógenos como los huevos de helminto.

### **1.2.2 NOM-002-SEMARNAT-1996**

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.

### **1.2.3. NOM-003-SEMARNAT-1997**

La NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y

es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

### **1.3 Tratamientos químicos para la remoción de metales pesados**

La remoción de metales pesados en aguas residuales requiere de altos costos, además de que pueden generar residuos secundarios o una poca eficiencia en la remoción.

- La microfiltración, ultrafiltración y la osmosis inversa son procesos costosos debido a la operación del proceso, y en el caso del intercambio iónico al reemplazo de las resinas.
- El uso de tecnologías como la electrocoagulación, requiere de una gran fuente externa de energía eléctrica.
- La utilización de coagulantes como  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeSO_4$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ , y  $FeCl_3$  para remover metales pesados.
- La flotación es utilizada para separar partículas de baja densidad de una fase líquida, en especial en tratamientos de aguas de procesos y efluentes de la industria metalúrgica, petroquímica, y aguas municipales (Mendez, Novelo, Coronado, & Castillo, 2008).
- El sulfato de plomo es utilizado para la remoción de cromo en aguas residuales, ya que esto se basa en la diferencia de solubilidad (Peng, *et al.*, 2018).

### **1.4 Biotecnologías**

La biotecnología es un conjunto de procesos y técnicas que aprovechan las propiedades de organismos vivos para producir bienes y servicios que sean de utilidad para el hombre (Muñoz, 2001).

El aumento de los costos y la limitada eficiencia de los tratamientos químicos han provocado el desarrollo de nuevas tecnologías, por lo que la fitorremediación representa una alternativa para la contaminación de efluentes.

#### **1.4.1 Fitorremediación**

La fitorremediación representa una tecnología alternativa, sustentable y de bajo costo para la remoción de efluentes contaminados mediante la utilización de plantas y microorganismos asociados a ellas, para remover, reducir transformar,

mineralizar, degradar, estabilizar o acumular contaminantes en sus tejidos (Delgadillo, Ramirez, & Prieto, 2011).

Esta tecnología se basa en la degradación o transformación de sustancias tóxicas como hidrocarburos, plaguicidas, compuestos clorados y metales pesados a través de reacciones enzimáticas llevadas a cabo en la rizósfera por las plantas y acumulan los metales en sus tejidos, mediante mecanismos de transformación o eliminación (López, *et al.*, 2008).

En la fitorremediación se identifican varios procesos de remediación que varían dependiendo de la parte de la planta que está involucrada con el proceso o los microorganismos que participan en él.

#### **1.4.1.1 Fitoestabilización**

La fitoestabilización es definida como la inmovilización de un contaminante mediante la adsorción, precipitación y acumulación por las raíces para disminuir su movilidad y biodisponibilidad para otras plantas y microorganismos y así evitar su movilidad a las capas subterráneas o al aire (Coto, Sánchez, & Pérez, 2012).

#### **1.4.1.2 Fitoextracción**

La captación de contaminantes a través de las raíces de las plantas mediante adsorción y su concentración en el interior se conoce como fitoextracción, se concentra principalmente en las partes cosechables (Martínez, *et al.*, 2010).

#### **1.4.1.3 Fitovolatilización**

Las plantas captan y modifican los contaminantes y los liberan de una forma volátil para posteriormente ser liberada a la atmósfera, esto se efectúa en la raíz y la liberación se lleva a cabo en la transpiración (González, *et al.*, 2017).

#### **1.4.1.4 Rizofiltración**

En la rizofiltración las raíces de las plantas absorben y concentran los contaminantes a partir de efluentes contaminados, con cadmio cobalto, mercurio plomo zinc y cromo (Martínez, *et al.*, 2010).

### 1.4.1.5 Fitodegradación

Este proceso se refiere a la degradación de contaminantes orgánicos para dar subproductos menos tóxicos a través de las enzimas de las plantas o por la acción de microorganismos rizosféricos (Martínez, *et al.*, 2010). En la Figura 1.1 se muestra un esquema de los procesos de fitorremediación.

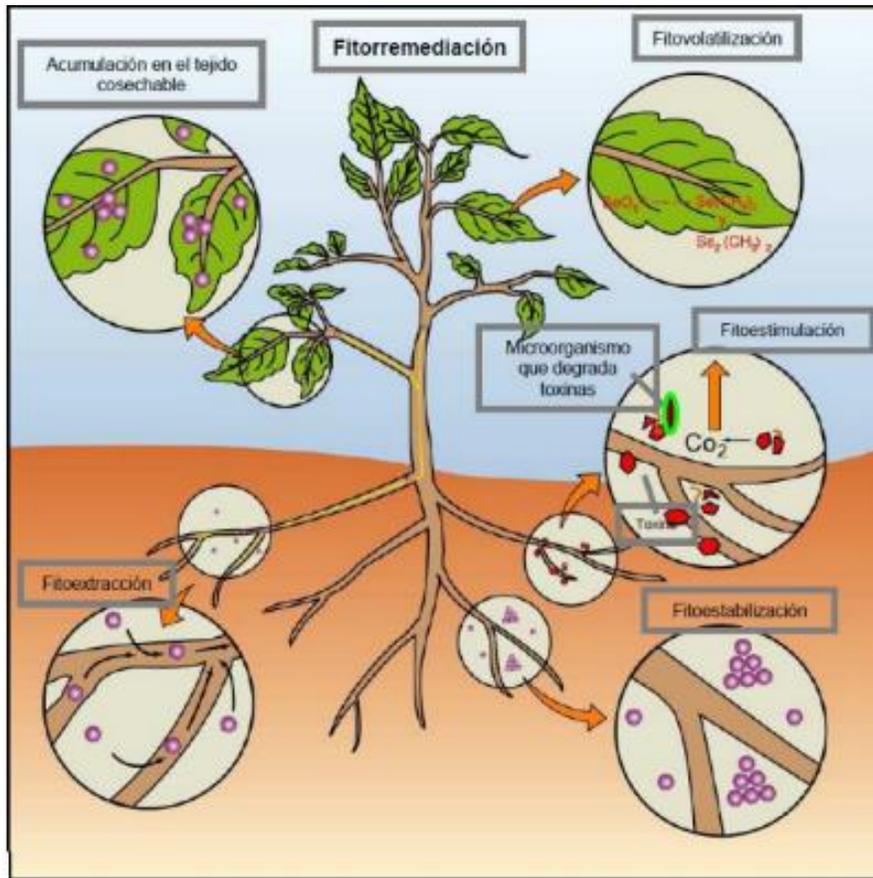


Figura 1.1 Procesos de fitorremediación (Hongn & Vottero, 2017)

### 1.4.2 Procesos *in situ* de fitorremediación

El uso de las tecnologías de remediación depende de factores como las propiedades fisicoquímicas del contaminante, su disponibilidad, su costo y de su estado de desarrollo, es decir, si se llevara a cabo en laboratorio, escala piloto o gran escala.

Dependiendo del lugar de realización, los procesos de remediación se dividen en dos tipos:

- *In situ*: el tratamiento se realiza en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación (Volke & Velasco, 2002).

- *Ex situ*: se requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para realizar el tratamiento fuera del área contaminada (Bonilla, 2013).

En la Tabla 1.1 se muestran las ventajas y desventajas de estas tecnologías.

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación *in situ* y *ex situ* (Volke & Velasco, 2002).

	<i>In situ</i>	<i>Ex situ</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Permiten tratar el área contaminada sin necesidad de excavar ni transportar</li> <li>✓ Disminución en costos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Menor tiempo de tratamiento</li> <li>✓ Es posible muestrear periódicamente</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mayor tiempo de tratamiento</li> <li>✓ Dificultad para verificar la eficacia del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Necesidad de excavar el suelo</li> <li>✓ Aumento de costos en maquinaria y equipos</li> <li>✓ Consideración de la manipulación del material y la posible exposición del contaminante</li> </ul>

## 1.5 Macrófitas flotantes

Las plantas acuáticas, también conocidas como macrófitas, tienen la característica de tomar los nutrientes directamente del agua, lo que ha permitido utilizarlas en la fitorremediación (Rubio, Delgado, & Amaya, 2016). Se han identificado una gran variedad de plantas empleadas en este proceso gracias a su capacidad de acumular metales pesados, estas reciben el nombre de hiperacumuladoras (Delgadillo, Ramirez, & Prieto, 2011).

Una de las ventajas de utilizar macrófitas es que pueden ser utilizadas como bombas de extracción de bajo costo para tratar aguas contaminadas, ya que pueden eliminar materia orgánica por medio de microorganismos asociados a su superficie o directamente a las raíces y pueden remediar grandes superficies (Zevallos, *et al.*, 2017) (Martelo & Borrero, 2012).

Las plantas acuáticas tienen diversos mecanismos de tolerancia a los metales pesados, estos mecanismos corresponden a la inmovilización del metal, y a su deposición en la pared celular (Rubio, Delgado, & Amaya, 2016).

### 1.5.1 *Salvinia natans*

*Salvinia natans* es un helecho acuático de flotación que se reproduce vegetativamente y es anisofila, es decir, produce dos tipos de hojas. Tiene dos hojas flotantes de color verde claro cubiertas de pelos y una hoja sumergida similar a una raíz de color marrón, que son las que absorben los nutrientes del agua y es el órgano reproductor de las plantas (Jampeetong & Brix, 2009). En la Figura 1.2 se muestra una fotografía de *Salvinia natans*.



Figura 1.2 Fotografía de *Salvinia natans* (Mulca, 2013).

En la Tabla 1.2 se muestra la taxonomía de *Salvinia natans*.

Tabla 1.2 Taxonomía de *Salvinia natans* (Danin, 2016)

Reino	Plantae
División	Pteridophyta
Clase	Pteridopsida
Orden	Salviniales
Familia	Salviniaceae
Genero	<i>Salvinia</i>

### 1.5.1.1 Características

**Nombre común:** Helecho acuático, Helecho de agua

**Descripción:** Helecho flotante

**Familia:** Salviniaceae.

**Distribución:** Cosmopolita. Originalmente Europa hasta Asia, incluyendo Siberia.

**Tamaño:** 2-10 cm de ancho. Bajo condiciones óptimas puede crecer a gran tamaño.

**Forma de propagación:** Por división espontánea y esporas. En condiciones favorables se multiplica rápidamente en la superficie.

**Temperatura:** 12° a 30°C.

**Agua:** pH: 5,5 – 8,5: soporta agua medianamente dura, aunque prospera mejor en la blanda.

**Iluminación:** Alta-muy alta.

**Tipo de sustrato:** Al ser una planta flotante crece en superficie sin necesidad de sustrato. Se le reconoce por ser una planta capaz de asimilar metales pesados tal como el plomo en asociación simbiótica con algas cianofitas, por ello puede ser una buena aliada en los acuarios donde se duda que tenga una buena calidad de agua o que por alguna razón ha sido contaminada por algún metal pesado (Mulca, 2013).

### **1.5.1.2 *Salvinia natans* y metales pesados**

*Salvinia natans* es una planta acuática flotante que tiene una alta tasa de crecimiento y tolerancia a altas concentraciones de metales pesados. Esta planta acuática puede acumular metales como Cd, Cu, Pb, Cr, Fe, Ni, Co, Mn y Zn (Dhir & Sheela, 2011).

*Salvinia natans* tiene un gran potencial para acumular altos niveles de Cr presente en aguas residuales, posee mecanismos de desintoxicación que incluyen enzimas antioxidantes, los cuales desempeñan un papel importante en la protección contra el estrés oxidativo. Además de que tiene una alta producción de biomasa en condiciones naturales, puede ser considerada para la fitorremediación de cuerpos de agua contaminados con Cr (VI) (Dhir, *et al.*, 2009).

## **1.6 Interacción entre metales y microorganismos**

Existen microorganismos que tienen la capacidad de reducir metales como As, Cu, Mo, Mn, Fe, Ag, Au, Hg y Cr, mediante la reducción convierten un alto estado de oxidación del metal a un estado de oxidación menor, las transformaciones se llevan a cabo de acuerdo a la capacidad fisiológica, mediante diferentes mecanismos, por ejemplo, gracias a reacciones enzimáticas o la excreción de un compuesto reductor que convierte el ion de un alto estado de oxidación a uno menor (García, *et al.*, 2008).

Estos microorganismos incluyen levaduras, hongos, bacterias y algas, y son capaces de acumular los metales dentro de su estructura celular. En el caso del Cr (VI) disminuyen su solubilidad dando lugar a su inmovilización, mientras que los mecanismos fisiológicos que están involucrados en la reducción del Cr (VI) varían dependiendo de la especie, por ejemplo, en algunos casos la reacción es catalizada por enzimas asociadas a la membrana celular (Panigatti, *et al.*, 2012).

La tolerancia de los metales llevada a cabo por microorganismos es posible gracias a los fenómenos de biosorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación, y quimiosorción, señalados en la Figura 1.3.

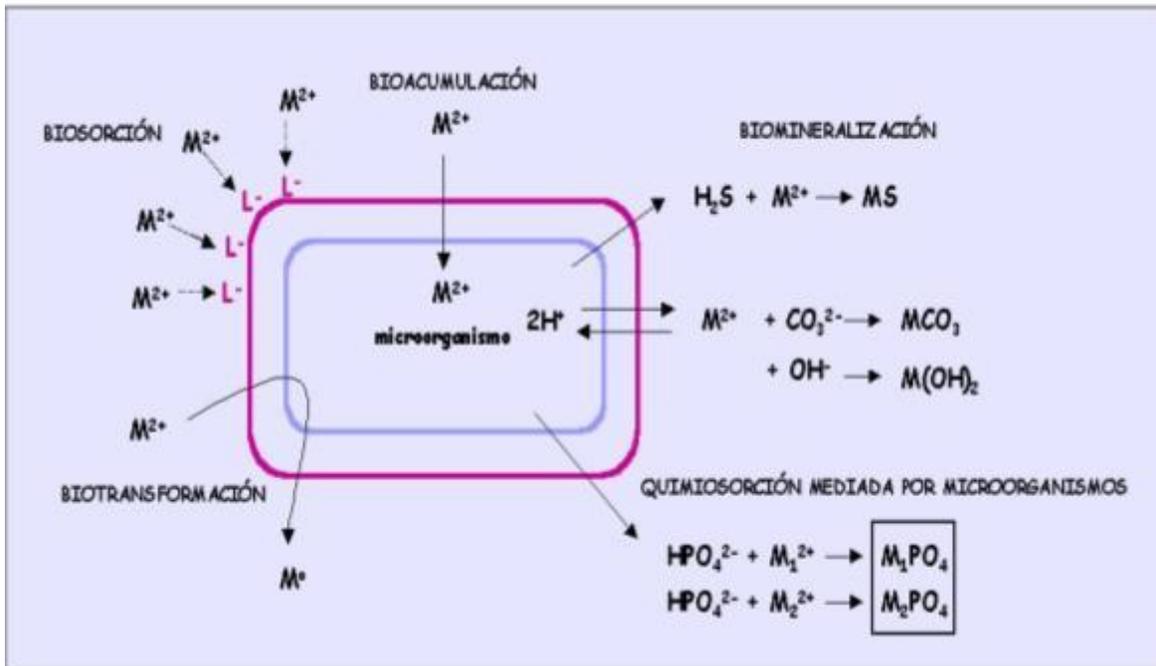


Figura 1.3 Mecanismos de interacción entre metales y microorganismos (Vullo, 2008).

### 1.6.1 Bioacumulación

Los metales se unen a la superficie celular a través de mecanismos que incluyen interacciones electrostáticas; los grupos cargados negativamente de la pared celular absorben los iones metálicos y son retenidos. Cuando los metales se unen a la superficie celular estos pueden ser bioacumulables, la bioacumulación es un proceso celular que involucra un sistema de transporte de membrana que internaliza el metal pesado presente en el entorno celular (Pineda & Rodríguez, 2016) es un proceso lento y depende del metabolismo celular y de su capacidad de atrapar mayor cantidad de iones (Suárez & Reyes, 2008)

### 1.6.2 Biosorción

La biosorción es la capacidad que tiene los microorganismos de atrapar metales uniéndolos a sus componentes estructurales. En este proceso se concentran e inmovilizan los metales pesados en soluciones acuosas. Los componentes de la superficie celular que actúan como bioabsorbentes son polímeros estructurales y extracelulares con un alto contenido de grupos funcionales que interactúan con los metales, atrapándolos dentro de su estructura (Suárez & Reyes, 2008).

### 1.6.3 Biomineralización

En este mecanismo los microorganismos son capaces de precipitar metales mediante a través de un mecanismo de resistencia codificado en plásmidos, el cual funciona con una bomba que expulsa el metal presente en el citoplasma hacia el exterior de la célula en contracorriente a un flujo de H<sup>+</sup> hacia el interior de la célula (Vullo, 2008).

### 1.6.4 Quimiosorción

La quimiosorción se refiere a todas las reacciones realizadas por los microorganismos que biomineralizan los metales formando un depósito primario. Este depósito primario funciona como núcleo de cristalización, con la subsecuente deposición del metal de interés, promoviendo y acelerando así el mecanismo de mineralización (Vullo, 2008).

### 1.6.5 Biotransformación

Es un proceso que en el que el metal sufre un cambio en su estado de oxidación, el cual es realizado por enzimas microbianas. Entre las transformaciones enzimáticas de los metales están la oxidación, reducción y metilación y pueden dar resultado a compuestos poco solubles en agua o compuestos volátiles (Marrero, Díaz, & Coto, 2010).

## 1.7 *Trichoderma*

*Trichoderma* es un hongo aerobio facultativo, y está presente de manera natural en suelos agrícolas, especialmente aquellos que contienen materia orgánica ya que son capaces de degradarla. En la Tabla 1.3 se muestra la taxonomía de *Trichoderma* y en la Figura 1.4 se muestra su fotografía.

Tabla 1.3 Taxonomía de *Trichoderma* (Argumedo, Alarcon, Ferrera, & Peña, 2009).

Género	<i>Trichoderma</i>
Reino	Mycetae (fungi)
División	Eumycota
Subdivisión	Deuteromycotina
Clase	Hyphomycetes
Orden	Hyphales
Familia	Moniliaceae



Figura 1.4 Fotografía de *Trichoderma* spp. (Toro & Osorio, 2012)

### **1.7.1 Condiciones óptimas de crecimiento**

El rango de temperatura para un crecimiento óptimo es de 25 a 30°C (Argumedo, Alarcon, Ferrera, & Peña, 2009). Las condiciones de humedad son de 70%, con un pH óptimo de 6.6 (Toro & Osorio, 2014).

### **1.7.2. Mecanismos de acción**

En lo referente a la biorregulación de organismos patógenos, *Trichoderma* es capaz de llevar a cabo una variedad de mecanismos para colonizar varios nichos ecológicos, algunas de estos mecanismos son el microparasitismo, la antibiosis y la competencia, las cuales se describen a continuación.

#### **1.7.2.1 Microparasitismo**

En este mecanismo las hifas de *Trichoderma* inician un crecimiento al entrar en contacto con las hifas del patógeno, y gracias a enzimas líticas como quitinasas, glucanas, celulasas, esterases, lipasas y proteasas comienza a degradarlas, este mecanismo está relacionado con la expresión de genes y la actividad enzimática de *Trichoderma* (Toro & Osorio, 2014).

### **1.7.2.2 Antibiosis**

*Trichoderma* tiene la capacidad de producir compuestos orgánicos volátiles como 2-propanona, 2-metil-1-butanol, heptanal, octanal, nonanal y decanal, los cuales son de gran importancia en la actividad biorreguladora de patógenos ya que inhiben el crecimiento y desarrollo de microorganismos patógenos (Infante, Martinez, Gonzalez, & Yusimy, 2009).

### **1.7.2.3 Competencia**

Este hongo tiene una rápida tasa de desarrollo, lo que hace que sea un fuerte competidor por el espacio a la hora de colonizar en la rizósfera. También tiene la capacidad de movilizarse fácilmente y tomar los nutrientes del suelo, lo que le permite colonizar rápidamente y así evitar la proliferación de otros microorganismos en el mismo hábitat (Błaszczuk, Siwulski, Sobieralski, Lisiec, & Jędrzycka, 2014).

### **1.7.3 Biorremediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos**

Existen especies de hongos, como *Trichoderma*, que tienen la capacidad enzimática de degradar compuestos orgánicos formados de carbono, hidrogeno y oxígeno. Gracias a esta capacidad los microorganismos transforman los contaminantes orgánicos en compuestos menos tóxicos (Argumedo, *et al.*, 2009).

### **1.7.4 Biorremediación de metales pesados**

Los metales son considerados contaminantes inorgánicos, ya que no pueden transformarse en otras sustancias ni atraviesan procesos de mineralización y son tóxicos por sus efectos nocivos en la cadena trófica (Pineda & Rodríguez, 2016). El microorganismo solamente inmoviliza el metal mediante métodos fisiológicos y bioquímicos, o cambian su estado de oxidación mediante los fenómenos de biosorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación y quimiosorción.

Se ha demostrado que *T. viride* tiene la capacidad de remover Cr (VI) en altas concentraciones, cuando se cultiva en matraces que contienen glucosa como fuente de carbono y energía, bajo condiciones aeróbicas. La presencia de contaminantes tóxicos puede afectar la nutrición del hongo, por ejemplo, hay una disminución del micelio, longitud y ramificaciones en presencia de Cu y Cd.

Algunas investigaciones reportan la habilidad de *T. viride* para tolerar y bioacumular Cu en su biomasa.

*T. asperellum* tiene la capacidad de tolerar concentraciones de cianuro, que es liberado al ambiente en aguas residuales provenientes de industrias dedicadas a actividades como el galvanizado de metales, electrolisis de aluminio, gasificación de carbón, lixiviación de minerales y en la síntesis de fármacos y plásticos. La contaminación por cianuro se ha tratado mediante métodos químicos como la precipitación, neutralización, hidrolisis y procesos de oxidación-reducción, la cuales pueden tener repercusiones al medio ambiente. Debido a esto, se han buscado alternativas biológicas para la remediación de sitios contaminados con este compuesto. *Trichoderma* se ha empleado para la descontaminación de cianuro, ya que cuenta con enzimas que son capaces de degradarlo.

La tolerancia de un microorganismo con respecto a los contaminantes tóxicos depende factores como el pH. De esta manera, la acumulación de Zn en *T. harzianum* aumentó 10 veces con un pH de entre 3 y 5. Gracias a todo lo anterior *Trichoderma* es un hongo capaz de retener metales pesados tanto en su micelio como en sus esporas (Argumedo, *et al.*, 2009).

### **1.7.5 Relación simbiótica con plantas**

Algunas plantas utilizadas en el proceso de fitorremediación tienen la desventaja de ser de lento crecimiento o generar poca biomasa, por eso se han buscado estrategias para incrementar su rendimiento en la fitoextracción de metales. Una de estas estrategias es la interacción de estas plantas con microorganismos (Peña, 2017).

*Trichoderma* es un hongo que está presente en la rizósfera, y juega un papel importante para las plantas que puede contribuir al control de hongos fitopatógenos (Argumedo, Alarcon, Ferrera, & Peña, 2009). Es un hongo que puede estimular el crecimiento de las plantas y su resistencia biótica y abiótica (Viterbo, *et al.*, 2010). *Trichoderma spp.* puede producir moléculas citoquininas, giberelinas y metabolitos secundarios como auxinas, las cuales están involucradas en los procesos de estimulación de crecimiento y desarrollo de las plantas (Toro & Osorio, 2012).

## **1.8 Antecedentes de *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* para remoción de Cr (VI)**

Investigaciones anteriores realizadas *ex situ*, demostraron la capacidad de *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* de remover Cr (VI) de aguas residuales.

Ayala (2016), llevó a cabo un proyecto de investigación en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo aplicando la técnica de fitorremediación *ex situ*, utilizando agua residual proveniente del arroyo El Granizo de León, Gto., usando *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma*. Este proceso se llevó a cabo durante el lapso de un mes, con cinco sistemas de tratamiento, donde tres tuvieron distintas concentraciones de Cr (VI) y los otros dos fueron testigos. El primer sistema con una concentración mínima de 520 mg/L y una remoción del 99.998%, el segundo sistema tenía una concentración intermedia de 2080 mg/L obteniéndose una reducción de 99.9995% y en el tercer sistema con una concentración máxima de 4160 mg/L y un porcentaje de remoción de 99.99997%.

## **Capítulo II**

### **Generalidades del proyecto**

## **2.1 Planteamiento del problema**

El cromo es un elemento que se encuentra de manera natural en las rocas, suelo, animales y plantas. En la actualidad el Cr (VI) es utilizado en diversas industrias por ejemplo, para el cromado, en la curtiduría, en la extracción de petróleo y en colorantes y pigmentos derivados de la industria textil, provocando la contaminación del agua, aire, suelo y del medio ambiente en general, así como severos daños al cuerpo humano, ya que las personas pueden respirar aire, tomar agua o comer alimentos que estén contaminados con cromo, y esto puede traer consecuencias a la salud como tos, malestares estomacales, problemas respiratorios, daño en riñones e hígado, y en concentraciones muy altas incluso la muerte (Molina, Casas, & Wandurraga, 2011).

En la industria de lavado y tinturado de prendas de vestir se utilizan grandes cantidades de agua, que al final del proceso se genera agua residual con residuos de colorantes y otros contaminantes como fenoles, sulfuros y cromo.

El problema radica en la descarga del agua contaminada a cuerpos hídricos, lo que provoca impactos ambientales debidos a que el agua es utilizada para riego en zonas agrícolas, lo que puede causar la contaminación de los cultivos y como consecuencia afectar la salud de las personas que consumen estos alimentos.

## **2.2 Justificación**

La contaminación del agua es causada debido a las descargas de las aguas residuales con grandes cantidades de Cr (VI) provenientes de industrias que utilizan este metal en sus procesos, como la curtiduría, en la fabricación del acero, depositándolas en cuerpos de agua como ríos, lagos, lagunas, etc., sin antes darle un previo tratamiento.

Se han desarrollado procesos y tratamientos químicos específicos para eliminar metales pesados del agua, pero tienen la desventaja de ser altamente costosos y algunos generan residuos secundarios, por lo que es necesario aplicar técnicas alternativas como la fitorremediación para la remoción de estos contaminantes.

La fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable y económica basada en los procesos bioquímicos realizados por plantas y microorganismos como la fitodegradación, fitoestabilización, fitoextracción y rizofiltración para disminuir la concentración o toxicidad de contaminantes presentes en agua o suelo.

## 2.3 Objetivos

### 2.3.1 Objetivo General

Realizar una remoción de Cr (VI) en agua mediante la utilización de *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* con el proceso *in situ offside* en un sitio contaminado con Cr (VI).

### 2.3.2 Objetivos Específicos

- Muestreo de agua en la Maquiladora Puerta de Palo Dulce Abasolo, Gto. para comprobar la presencia de Cr (VI) en base a la NMX-AA-003-1980.
- Realizar sistema de contención para el agua residual.
- Análisis de Cr (VI).
- Análisis de parámetros de calidad del agua.
- Incorporación de *Salvinia natans* y *Trichoderma*.
- Monitoreo de la concentración de Cr (VI).

## 2.4 Hipótesis

Se espera una remoción de Cr (VI) en agua utilizando la técnica de fitorremediación con *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* mediante el proceso *in situ offside*.

# **Capítulo III**

## **Materiales y métodos**

### **3.1 Muestreo de agua residual en la comunidad de Puerta de Palo Dulce Abasolo, Gto., en base a la NMX-AA-003-1980.**

#### **3.1.1 Materiales**

1 Recipiente de plástico de 2 L esterilizado y etiquetado

1 Recipiente de 1 L

1 cubeta

Cubre bocas

Bata

Guantes

Lazo

Hielera

#### **3.1.2 Metodología**

Después de elegir el sitio, realizar el muestreo en base a la norma NMX-AA-003-1980.

1. Hacer uso de la bata, cubre bocas y guantes.
2. Tomar la muestra del sitio de muestreo con ayuda de la cubeta.
3. Con el recipiente de 1 litro vaciar la muestra de agua en el recipiente previamente esterilizado y etiquetado.
4. Cerrar el recipiente e introducirlo en la hielera.

## **3.2 Determinación de Cromo (VI) en base a la NMX- AA-044-SCFI-2014**

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, potables, residuales y residuales tratadas.

El método se basa en una reacción donde el cromo (VI) reacciona con la 1,5-difenilcarbazida en medio ácido para dar un complejo color rojo violeta de composición desconocida que es determinado espectrofotométricamente a 540 nm. La intensidad de color es directamente proporcional a la concentración de cromo hexavalente (DOF, 2014).

### **3.2.1 Materiales y reactivos**

Espectrofotómetro (Modelo: UV- 1500PC de RoHS)

Balanza analítica

1 pipeta de 1 mL

1 pipeta de 5 mL

1 pipeta de 10 mL

1 micropipeta de 200

Puntas de plástico

Celdas

Piseta

Probeta

2 vasos de precipitados de 250 mL

9 tubos Falcón

1 gradilla

Agua destilada

1, 5-Difenilcarbazida

Acetona

Ácido sulfúrico concentrado

Dicromato de potasio

Disolución intermedia de Cr

### **3.2.2 Metodología**

#### **3.2.2.1 Preparación de las disoluciones**

1. Disolución de 1, 5-Difenilcarbazida: pesar 0.125 g de Difenilcarbazida y disolver en 25 mL de acetona.

NOTA: esta solución debe prepararse al momento de su uso, por ello se debe tomar en cuenta el volumen necesario.

2. Disolución de ácido sulfúrico 1:1 (50%): tomar 100 ml de ácido sulfúrico concentrado y llevarlo hasta 200 mL en un balón aforado con agua.

NOTA: Esta disolución debe prepararse en la campana de extracción.

Disolución madre de cromo: pesar 141.45 mg de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), disolver con agua y llevar al aforo a 100 mL.

3. Disolución intermedia de cromo: tomar 1 mL de la solución madre de cromo y enrasar a 100 mL de agua destilada.

#### **3.2.2.2 Análisis de Cr (VI)**

1. Pipetear volúmenes crecientes de solución intermedia de cromo y enrasar a 5 ml de agua destilada en 7 tubos de ensayo.

NOTA: Los volúmenes crecientes fueron de 0.1 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 4.9 mL de agua; 0.2 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 4.8 mL de agua; 0.5 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 4.5 mL de agua; 0.8 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 4.2 mL de agua; 1.5 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 3.5 mL de agua; 2 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 3 mL de agua; 4 mL de solución intermedia de Cr (VI) y 1 mL de agua.

2. Preparar la disolución de difenilcarbazida.
3. Para el desarrollo de color se agregan 0.05 ml de ácido sulfúrico y 0.1 ml de la disolución de difenilcarbazida, y dejar reposar por 10 minutos.

4. Preparar un blanco con agua destilada para ajustar el espectrofotómetro a la lectura cero y preparar la muestra a analizar, posteriormente encender y ajustar la lectura en la determinación de absorbancia a 540 nm.
5. Leer con el espectrofotómetro con celdas de paso óptico de 1 cm.

### **3.3 Análisis de parámetros del agua**

#### **3.3.1 Análisis para determinar sólidos sedimentables en base a la NMX- AA-004-SCFI-2019**

La materia sedimentable se define como la cantidad de sólidos que en un tiempo determinado se depositan en el fondo de un recipiente en condiciones estáticas (DOF, 2013).

##### **3.3.1.1 Materiales**

Cono de sedimentación tipo Imhoff de vidrio o plástico

Bases para conos Imhoff

Agitador

Reloj o cronometro

##### **3.3.1.2 Metodología**

1. Mezclar la muestra con el fin de lograr una distribución homogénea de sólidos suspendidos a través de toda la muestra de agua.
2. Colocar la muestra mezclada en un cono Imhoff hasta la marca de 1 L.
3. Dejar sedimentar 45 minutos, y una vez transcurrido este tiempo desprender suavemente los sólidos adheridos a las paredes del cono con un agitador y mantener en reposo 15 minutos más.
4. Registrar el volumen de sólidos en mL/L.

### **3.3.2 Análisis para determinar cloro**

La cloración de aguas se utiliza para destruir los microorganismos causantes de enfermedades. El cloro aplicado al agua sufre diversas reacciones para producir cloro libre que consiste en cloro molecular acuoso, ácido hipocloroso e ion hipoclorito. La concentración y presencia de las especies de cloro libre y combinado depende de la temperatura, pH, y tiempo de reacción. Tanto el cloro libre como el combinado pueden presentarse simultáneamente en el agua (DOF, 2001).

El análisis se llevó a cabo con el HI 38022 kit de prueba de alto rango de cloro total, de HANNA instruments®.

#### **3.3.2.1 Materiales y reactivos**

1 pipeta de plástico de 1 mL

1 agitador

1 recipiente de plástico de 20 mL

Solución de yoduro de potasio

Indicador de almidón

Reactivo de tiosulfato

Reactivo sulfámico

#### **3.3.2.2 Metodología**

1. Usando la pipeta de plástico de 3 mL, llenar el recipiente de plástico (20 mL) con la muestra de agua hasta la marca de 10 ml.
2. Agregar 5 gotas de la solución de yoduro de potasio y agitar suavemente para mezclar.
3. Agregar 1 paquete del reactivo sulfámico y mezclar bien con ayuda del agitador.
4. Agregar 1 gota del indicador de almidón y agitar suavemente. Si existe la presencia de cloro, la solución se volverá azul.
5. Usando la pipeta de 1 ml, agregar gota a gota el reactivo de tiosulfato, mezclando después de cada gota, mientras se mantiene un conteo de las gotas que se agregan a la solución.

6. Continuar agregando el reactivo de tiosulfato hasta que la solución cambie de azul a incolora.
7. La concentración en mg/L (o ppm) de cloro total en la muestra es igual al número de gotas del reactivo de tiosulfato agregado para volver la solución incolora.

$$\text{Gotas x 1} = \text{mg/L de cloro total}$$

### **3.3.3 Medición del pH en base a la NMX-AA-008-SCFI-2016**

La medición del pH es muy importante para muchos tipos de muestra. Es el parámetro más importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control.

La medición del pH se llevó a cabo con el HI 2211 Medidor de Sobremesa de pH/mV/°C con Microprocesador de HANNA instruments®.

#### **3.3.3.1 Materiales y equipos**

Recipiente de muestreo

pHmetro

Agua destilada

#### **3.3.3.2 Metodología**

Sumergir el electrodo en la muestra, agitar levemente y esperar a que la lectura de pH se estabilice, registrar por lo menos 3 lecturas y en cada medición enjuagar el electrodo de pH con agua destilada.

NOTA: la diferencia de las 3 lecturas obtenidas no deberá variar por más de 0.03 unidades de pH. En caso de que así sea, repetir si es posible con otra porción de muestra problema.

#### **3.3.4 Análisis de nitratos**

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Una alta concentración de nitratos es

indicio de una atapa mayor de mineralización de compuestos nitrogenados (DOF, 2001).

### **3.3.4.1 Materiales y reactivos**

Fotómetro multiparámetros de mesa para pruebas ambientales (Modelo: HI 83206 de HANNA instruments®)

2 frascos de vidrio

1 paquete del agente en polvo HI 93728-01 de HANNA instruments® para determinación de nitratos

Agua destilada

### **3.3.4.2 Metodología**

1. Llenar el frasco con 10 mL preparando una disolución de 1:1 con la muestra de agua y agua destilada.
2. Agregar el reactivo al frasco con la disolución de agua y agitar.
3. Presionar el botón METHOD y seleccionar Nitratos
4. Presionar la tecla CERO, la pantalla mostrará "-0.0-" cuando el medidor esté en cero y listo para la medición.
5. Colocar el frasco en el soporte del fotómetro y cerrar la tapa.
6. Presionar TIMER, esperar 4 minutos y 30 segundos y presionar READ. El instrumento muestra la concentración en mg/L.

NOTA: El método utilizado para este análisis es el de reducción de cadmio.

### **3.3.5 Análisis de nitritos**

El nitrito considerado como una etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno puede estar presente en el agua como resultado de la descomposición biológica de materiales proteicos. se puede producir el nitrito en las plantas de tratamiento o en los sistemas de distribución de agua, como resultado de la acción de bacterias sobre el nitrógeno amoniacal (DOF, 2006).

### **3.3.5.1 Materiales y reactivos**

Fotómetro multiparámetros de mesa para pruebas ambientales (Modelo: HI 83206 de HANNA instruments®)

2 frascos de vidrio

1 paquete del agente en polvo HI 93707-01 de HANNA instruments® para determinación de nitritos

Agua destilada

### **3.3.5.2 Metodología**

1. Llenar el frasco con 10 mL preparando una disolución de 1:1 con la muestra de agua y agua destilada.
2. Agregar el reactivo al frasco con la disolución de agua y agitar.
3. Presionar el botón METHOD y seleccionar Nitratos
4. Presionar la tecla CERO, la pantalla mostrará "-0.0-" cuando el medidor esté en cero y listo para la medición.
5. Colocar el frasco en el soporte del fotómetro y cerrar la tapa.
6. Presionar TIMER, esperar 6 minutos y presionar READ. El instrumento muestra la concentración en mg/L.

NOTA: El método utilizado para este análisis es el de diazotización.

## **3.4 Adecuación del sitio**

Para llevar a cabo el proyecto primero se delimito el área de trabajo, la cual se encontraba cerca del sitio de descarga de agua residual, posteriormente se realizó la limpieza donde se implementaron lo sistemas, ya que cerca de la zona de descarga se encontraba gran cantidad de maleza. Para ello se utilizaron herramientas como hoz o guadaña de mano, azadón, pala etc. En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestra la limpieza del sitio, el antes y después.



Figura 3.1 Limpieza del sitio



Figura 3.2 Antes de la limpieza del sitio



Figura 3.3 Después de la limpieza del sitio

### 3.5 Implementación de sistemas

Se realizaron 2 sistemas de contención para retener el agua a tratar, con un diámetro de 1 metro y 1.5 metros de profundidad, los sistemas contaban con aproximadamente 500 litros de agua cada uno, los cuales se establecieron a 0.5 metros del sitio de descarga del agua residual. Se les colocaron hules de 3x4m aproximadamente a cada sistema con el fin de evitar que se filtre el agua, además de un pequeño tejado de lámina para impedir que le llegaran los rayos del sol ya que las plantas no pueden estar más de 6 horas expuestas al sol.

El sistema 1 contenía *Salvinia natans* y *Trichoderma* y el sistema 2 contenía *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana*. El segundo sistema se realizó para ver la efectividad de remoción de Cr (VI) con ambas plantas trabajando en conjunto.

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran fotografías de la instalación del tejado y de los sistemas antes de la incorporación de *Salvinia natans* y *Trichoderma*, y *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana*.



Figura 3.4 Instalación del tejado



Figura 3.5 Fotografía de los sistemas antes de la incorporación de *Salvinia natans* y *Trichoderma* en el sistema 1, y *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana* en el sistema 2.

El llenado de los sistemas se hizo cuatro días antes de la incorporación de *Salvinia natans* y *Trichoderma*, y *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana* para verificar que no hubiera alguna fuga por parte del hule colocado y comprobar que el agua se mantenía retenida.

En el sistema 1 se colocaron aproximadamente 100 plantas de *Salvinia natans* y aproximadamente 50 gr de *Trichoderma*, el cual se agregó en forma de polvo.

En el sistema 2 se colocaron aproximadamente 80 plantas de *Salvinia natans*, 200 plantas de *Azolla caroliniana* y aproximadamente 50 gr de *Trichoderma*, el cual se agregó en forma de polvo.

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran fotografías de la incorporación de *Salvinia natans* y *Trichoderma*, y *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana* a los sistemas.



Figura 3.6 Incorporación de *Salvinia natans* y *Trichoderma* al sistema 1.



Figura 3.7 Incorporación de *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana* al sistema 2.

### 3.6 Monitoreo y mantenimiento

Se observó y monitoreo constantemente el sistema, para el mantenimiento de las plantas se le agregaron 50 ml de Natural Gro AZOO® Plant Premium cada 3 días, el cual contiene nitrógeno, fosforo, y potasio.

El sistema se cercó para evitar la entrada de animales. Se eliminó la maleza periódicamente para permitir la entrada de los rayos del sol al sistema. Se tomaron muestras periódicas de agua para analizar la remoción de Cr (VI). En la Figura 3.8 se muestra el cercado de los sistemas.



Figura 3.8 Cercado del sistema

### 3.7 Incineración de la planta

Una vez que se terminó el proceso, las plantas fueron incineradas a una temperatura de 90° por 1 hora y media, como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.9 Incineración de *Salvinia natans*

## **Capítulo IV**

### **Resultados y discusión**

## 4.1 Ubicación del sistema

El sistema realizado para llevar a cabo el proceso para la remoción de Cr (VI) utilizando *Salvinia natans* y *Trichoderma* mediante la técnica *in situ offside* se llevó a cabo durante el periodo de 3 meses y fue ubicado en la Maquiladora Textil Puerta de Palo Dulce, Abasolo, Gto., con las coordenadas 20°28'52.201" latitud norte y 101°30'18.381" longitud oeste. En la Figura 4.1 se muestra su ubicación.



Figura 4.1 Ubicación de la Maquiladora Textil Puerta de Palo Dulce Abasolo, Gto. (Google maps).

## 4.2 Análisis de la determinación de Cr (VI) en muestra de agua

Durante el proceso de fitorremediación se llevaron a cabo 6 análisis, a continuación, se muestran los resultados de cada análisis con el porcentaje de remoción de Cr (VI) entre cada uno.

### 4.2.1 Primer análisis de Cr (VI)

Del análisis realizado se calculó la concentración de Cr (VI) mediante la ecuación de la pendiente, donde se utilizaron las absorbancias leídas por el espectrofotómetro las cuales se muestran en la Tabla 4.1 y la absorbancia de la muestra.

Tabla 4.1 Absorbancias del primer análisis (González, 2018).

<b>x</b> <b>Concentración</b> <b>en ppm</b>	<b>y</b> <b>Absorbancia</b>	<b>Absorbancia</b> <b>de la</b> <b>muestra</b>
0.05	0.028	0.480
0.1	0.053	
0.25	0.114	
0.4	0.172	
0.75	0.266	
1	0.359	
2	0.553	

Para obtener la concentración se utilizó la ecuación de la pendiente y se realizó un respectivo despeje como se muestra a continuación.

$$y=mx+b$$

$$x=(y-b)/m$$

donde:

**y**= absorbancia de la muestra

**b**= intersección

**m**= ordenada a la pendiente

**x**= concentración en ppm

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la ordenada a la pendiente e intersección, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0.9881 lo cual indica que los datos son representativos y confiables.

$$m= 0.2691$$

$$b= 0.0457$$

Y sustituyendo en la formula despejada nos queda:

$$x= \frac{(0.48-(0.0457))}{0.2691}$$

$$x= \mathbf{1.6138 \text{ ppm}}$$

Esto significa que la concentración inicial de Cr (VI) es de **1.6138 ppm**, lo que indica que está por encima de los límites máximos permisibles, de acuerdo a la

NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, esta norma señala un límite máximo permisible de 0.5 ppm.

#### 4.2.2 Segundo análisis de Cr (VI)

Para el segundo análisis se determinó la concentración de Cr (VI) mediante la ecuación de la pendiente. En la Tabla 4.2 se muestran las absorbancias leídas.

Tabla 4.2 Absorbancias del segundo análisis (González, 2018).

x Concentración en ppm	y Absorbancia	Absorbancia de la muestra
0.05	0.019	0.470
0.1	0.045	
0.25	0.105	
0.4	0.159	
0.75	0.314	
1	0.339	
2	0.58	

Para obtener la concentración nuevamente se utilizó la ecuación de la pendiente y se realizó un respectivo despeje como se muestra a continuación.

$$y=mx+b$$

$$x=(y-b)/m$$

donde:

**y**= absorbancia de la muestra

**b**= intersección

**m**= ordenada a la pendiente

**x**= concentración en ppm

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la ordenada a la pendiente e intersección, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0.9728 lo cual indica que los datos son representativos y confiables.

$$m= 0.2870$$

$$b= 0.0364$$

Y sustituyendo en la formula despejada nos queda:

$$x= \frac{(0.47-(0.0364))}{0.2870}$$

$$x= 1.5105 \text{ ppm}$$

Esto significa que la concentración de Cr (VI) en el segundo análisis es de **1.5105 ppm**.

El porcentaje de remoción de Cr (VI) entre el análisis 1 y 2 se determinó de la siguiente manera

$$1.6138 \text{ ppm} \rightarrow 100 \%$$

$$1.5105 \text{ ppm} \rightarrow x$$

$$X=93.5989 \%$$

Entonces entre al análisis 1 y 2 hubo una disminución del Cr (VI) de 6.4011 %.

### 4.2.3 Tercer análisis de Cr (VI)

Para el tercer análisis se determinó la concentración de Cr (VI) mediante la ecuación de la pendiente. En la Tabla 4.3 se muestran las absorbancias leídas.

Tabla 4.3 Absorbancias del tercer análisis (González, 2018).

x Concentración en ppm	y Absorbancia	Absorbancia de la muestra
0.05	0.02	0.378
0.1	0.08	
0.25	0.143	
0.4	0.149	
0.75	0.288	
1	0.439	
2	0.86	

Para obtener la concentración se utilizó la ecuación de la pendiente y se realizó un respectivo despeje como se muestra a continuación.

$$y=mx+b$$

$$x=(y-b)/m$$

donde:

**y**= absorbancia de la muestra

**b**= intersección

**m**= ordenada a la pendiente

**x**= concentración en ppm

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la ordenada a la pendiente e intersección, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0.9919 lo cual indica que los datos son representativos y confiables.

$$m= 0.4200$$

$$b= 0.0096$$

Y sustituyendo en la formula despejada nos queda:

$$x= \frac{(0.378-(0.0096))}{0.4200}$$

$$x= \mathbf{0.8771 \text{ ppm}}$$

Esto significa que la concentración de Cr (VI) en el tercer análisis es de **0.8771 ppm**.

El porcentaje de remoción de Cr (VI) entre el análisis 2 y 3 se determinó de la siguiente manera

$$1.5105 \text{ ppm} \rightarrow 100 \%$$

$$0.8771 \text{ ppm} \rightarrow x$$

$$X= 58.0668\%$$

Entonces entre al análisis 2 y 3 hubo una disminución del Cr (VI) de 41.9332 %.

#### 4.2.4 Cuarto análisis de Cr (VI)

Para el cuarto análisis se determinó la concentración de Cr (VI) mediante la ecuación de la pendiente. En la Tabla 4.4 se muestran las absorbancias leídas.

Tabla 4.4 Absorbancias del cuarto análisis (González, 2018).

<b>x</b> <b>Concentración</b> <b>en ppm</b>	<b>y</b> <b>Absorbancia</b>	<b>Absorbancia</b> <b>de la</b> <b>muestra</b>
0.05	0.044	0.297
0.1	0.047	
0.25	0.097	
0.4	0.199	
0.75	0.391	
1	0.388	
2	0.816	

Para obtener la concentración se utilizó la ecuación de la pendiente y se realizó un respectivo despeje como se muestra a continuación.

$$y=mx+b$$

$$x=(y-b)/m$$

donde:

**y**= absorbancia de la muestra

**b**= intersección

**m**= ordenada a la pendiente

**x**= concentración en ppm

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la ordenada a la pendiente e intersección, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0.9846 lo cual indica que los datos son representativos y confiables.

$$m= 0.3998$$

$$b=0.0232$$

Y sustituyendo en la formula despejada nos queda:

$$x= \frac{(0.297-(0.0232))}{0.3998}$$

$$x= \mathbf{0.6846 \text{ ppm}}$$

Esto significa que la concentración de Cr (VI) en el cuarto análisis es de **0.6846 ppm**.

El porcentaje de remoción de Cr (VI) entre el análisis 3 y 4 se determinó de la siguiente manera

$$0.8771 \text{ ppm} \rightarrow 100 \%$$

$$0.6846 \text{ ppm} \rightarrow x$$

$$X = 78.0526\%$$

Entonces entre al análisis 3 y 4 hubo una disminución del Cr (VI) de 21.9474 %.

#### 4.2.5 Quinto análisis de Cr (VI)

Para el quinto análisis se determinó la concentración de Cr (VI) mediante la ecuación de la pendiente. En la Tabla 4.5 se muestran las absorbancias leídas.

Tabla 4.5 Absorbancias del quinto análisis (González, 2018).

<b>x</b> <b>Concentración</b> <b>en ppm</b>	<b>y</b> <b>Absorbancia</b>	<b>Absorbancia</b> <b>de la</b> <b>muestra</b>
0.05	0.017	0.184
0.1	0.039	
0.25	0.105	
0.4	0.138	
0.75	0.258	
1	0.390	
2	0.796	

Para obtener la concentración se utilizó la ecuación de la pendiente y se realizó un respectivo despeje como se muestra a continuación.

$$y = mx + b$$

$$x = (y - b) / m$$

donde:

**y**= absorbancia de la muestra

**b**= intersección

**m**= ordenada a la pendiente

**x**= concentración en ppm

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la ordenada a la pendiente e intersección, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0.9965 lo cual indica que los datos son representativos y confiables.

$$m = 0.3974$$

$$b = -0.0093$$

Y sustituyendo en la fórmula despejada nos queda:

$$x = \frac{(0.184 - (-0.0093))}{0.3974}$$

$$x = 0.4864 \text{ ppm}$$

Esto significa que la concentración de Cr (VI) en el cuarto análisis es de **0.4864 ppm**.

El porcentaje de remoción de Cr (VI) entre el análisis 4 y 5 se determinó de la siguiente manera

$$0.6846 \text{ ppm} \rightarrow 100 \%$$

$$0.4864 \text{ ppm} \rightarrow x$$

$$X = 71.0487\%$$

Entonces entre al análisis 4 y 5 hubo una disminución del Cr (VI) de 28.9513 %.

#### 4.2.6 Sexto análisis de Cr (VI)

Para el sexto análisis se determinó la concentración de Cr (VI) mediante la ecuación de la pendiente. En la Tabla 4.6 se muestran las absorbancias leídas.

Tabla 4.6 Absorbancias del sexto análisis (González, 2018).

x Concentración en ppm	y Absorbancia	Absorbancia de la muestra
0.05	0.074	0.198
0.1	0.099	
0.25	0.182	
0.4	0.210	
0.75	0.263	
1	0.451	
2	0.859	

Para obtener la concentración se utilizó la ecuación de la pendiente y se realizó un respectivo despeje como se muestra a continuación.

$$y=mx+b$$

$$x=(y-b)/m$$

donde:

**y**= absorbancia de la muestra

**m**= ordenada a la pendiente

**b**= intersección

**x**= concentración en ppm

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la ordenada a la pendiente e intersección, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0.9810 lo cual indica que los datos son representativos y confiables.

$$m= 0.3942$$

$$b=0.0491$$

Y sustituyendo en la formula despejada nos queda:

$$x= \frac{(0.198-(0.0491))}{0.3942}$$

$$x= \mathbf{0.3777 \text{ ppm}}$$

Esto significa que la concentración de Cr (VI) en el cuarto análisis es de **0.37777 ppm**.

El porcentaje de remoción de Cr (VI) entre el análisis 5 y 6 se determinó de la siguiente manera

$$0.4864 \text{ ppm} \rightarrow 100 \%$$

$$0.3777 \text{ ppm} \rightarrow x$$

$$X=77.6521\%$$

Entonces entre al análisis 5 y 6 hubo una disminución del Cr (VI) de 22.3479 %.

En la Figura 4.2 se presenta una gráfica los resultados de remoción de Cr (VI) de los análisis realizados del sistema 1, desde la concentración inicial.

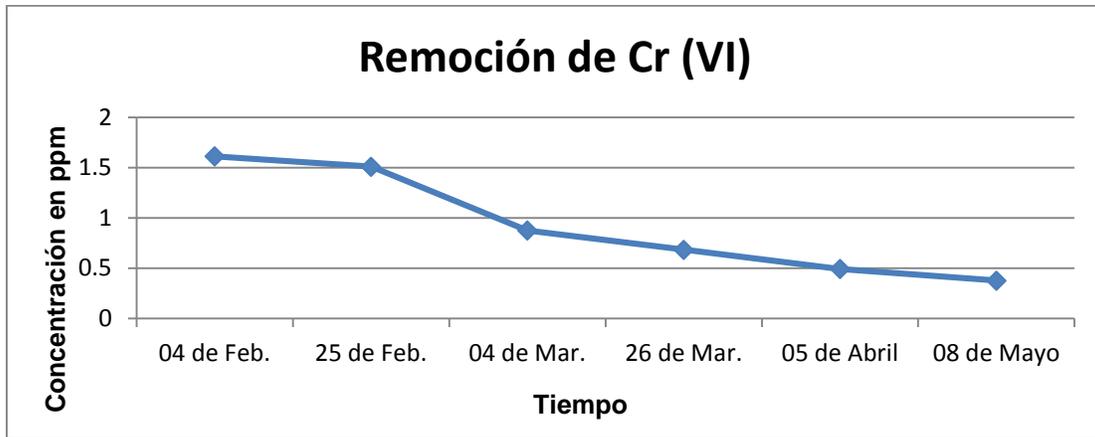


Figura 4.2 Variación de la concentración de Cr (VI) del sistema 1 (González, 2019).

#### 4.2.7 Remoción total de Cr (VI)

A continuación, se muestra en la Tabla 4.7 las concentraciones de Cr (VI) inicial y final del proceso

Tabla 4.7 Concentraciones de Cr (VI) y límite máximo permisible

		Límite máximo permisible
Concentración inicial de Cr (VI)	1.6138 ppm	0.5 mg/L o ppm
Concentración final de Cr (VI)	0.3777 ppm	

El porcentaje total de remoción de Cr (VI) se calculó de la siguiente manera

Concentración inicial: 1.6138 ppm → 100 %

Concentración final: 0.3777 ppm → x

$$X = 23.4043\%$$

Entonces hubo una remoción total de Cr (VI) del **76.5957%**.

### 4.3 Análisis de parámetros del agua

Además de los análisis de Cr (VI) se realizaron análisis para determinar parámetros de calidad de agua, los resultados se muestran en la tabla 4.8

Tabla 4.8 Resultados de análisis de parámetros del agua (González, 2019).

Parámetro	Límite máximo permisible	Resultados	
		Concentración inicial	Concentración final
Sólidos sedimentables	1 mL/L	4 mL/L	0.1 mL/L
Nitritos	0.05 mg/L	0.5 mg/L	0 mg/L
Nitratos	10 mg/L	0 mg/L	0 mg/L
Cloro		5 mL/L	0 mL/L
DBO	150 mg/L	129.50 mg/L	71.19 mg/L
pH		6.77 unidades de pH	6.70 unidades de pH

NOTA: Los análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno se realizaron en el laboratorio O.P. Distribuidora del Bajío S.A. de C.V., Irapuato, Guanajuato.

## 4.4 Resultados de análisis de agua del sistema 2

### 4.4.1 Análisis de remoción de Cr (VI)

Se llevaron a cabo 6 análisis, incluyendo la concentración inicial y final, en la Tabla 4.9 se muestran los resultados de cada análisis con el porcentaje de remoción de Cr (VI) entre cada uno.

Tabla 4.9 Concentraciones de Cr (VI) y porcentajes de remoción entre cada análisis (González, 2019).

Análisis	Concentración en ppm	% de remoción	
1	2.5908		
2	2.13767	Entre el análisis 1 y 2	17.4926
3	1.21011	Entre el análisis 2 y 3	43.38
4	1.04224	Entre el análisis 3 y 4	13.8748
5	0.7355	Entre el análisis 4 y 5	29.4281
6	0.69451	Entre el análisis 5 y 6	5.5744
		<b>% de remoción total</b>	<b>73.1936</b>

En la Figura 4.3 se presenta en una gráfica los resultados de remoción de Cr (VI) todos los análisis realizados del sistema 2, desde la concentración inicial.

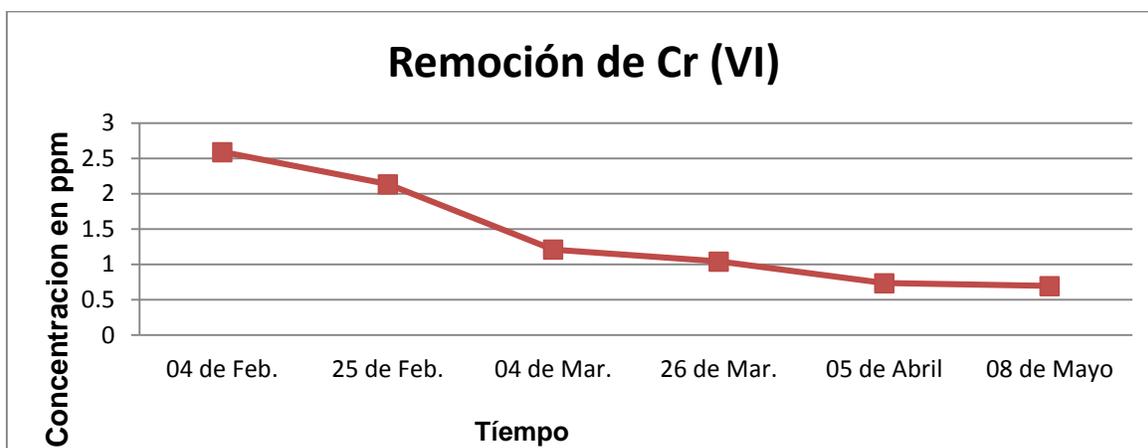


Figura 4.3 Variación de la concentración de Cr (VI) del sistema 2 (González, 2019).

#### 4.4.2 Análisis de parámetros del agua

A demás de los análisis de Cr (VI) se realizaron análisis para determinar parámetros de calidad de agua, los resultados se muestran en la tabla 4.10

Tabla 4.10 Resultados de análisis de parámetros del agua del sistema 2 (González, 2019).

Parámetro	Límite máximo permisible	Resultados	
		Concentración inicial	Concentración final
Sólidos sedimentables	1 mL/L	1.5 mL/L	1 mL/L
Nitritos	0.05 mg/L	0.75 mg/L	0 mg/L
Nitratos	10 mg/L	0 mg/L	0 mg/L
Cloro		5 mL/L	0 mL/L
DBO	150 mg/L	119.50 mg/L	47.69 mg/L
pH		6.78 unidades de pH	6.71 unidades de pH

NOTA: Los análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno se realizaron en el laboratorio O.P. Distribuidora del Bajío S.A. de C.V., Irapuato, Guanajuato.

# **Conclusiones**

Como conclusiones de este proyecto, se cumplió el objetivo general y los objetivos específicos favorablemente, así como la hipótesis, ya que se comprobó que *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* tiene la capacidad de acumular y remover Cr (VI) de agua mediante el proceso de fitorremediación *in situ offside*.

A pesar de que el proceso no contaba con las condiciones controladas por ser un proceso *in situ*, *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* mostró un comportamiento satisfactorio para la remoción de Cr (VI).

Se demostró que utilizar este tipo de tecnologías como la fitorremediación es una buena alternativa para la remoción de Cr (VI) en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con este metal, ya que se puede tratar el agua sin necesidad de trasladarla, lo que implica una reducción en los costos, además de que son de fácil mantenimiento.

Con respecto al sistema 2 que contenía *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana*, se comprobó que las dos plantas trabajando en conjunto son eficientes para la remoción de Cr (VI), con un porcentaje de remoción total del 73.1936%.

Se concluye que utilizar *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* tuvo un mayor porcentaje de remoción de Cr (VI) que utilizar *Salvinia natans*, *Trichoderma* y *Azolla caroliniana*, debido a que la concentración inicial de Cr (VI) fue mayor que el sistema 1 que contenía *Salvinia natans* y *Trichoderma*. Se considera que el proceso de fitorremediación *in situ offside* para la remoción de Cr (VI) utilizando *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma* es una técnica factible para utilizarse en la Maquiladora Textil Puerta de Palo Dulce, ya que no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales y esta técnica es barata, sustentable y de fácil mantenimiento. Se recomienda a la empresa crear sistemas de contención mayores para retener mayor cantidad de agua y poder llevar a cabo el proceso de fitorremediación utilizando *Salvinia natans* en interacción con *Trichoderma*, así como llevar a cabo el proceso por un mayor periodo para obtener mejores porcentajes de remoción. Se considera una buena técnica para implementarse en industrias que utilizan Cr (VI) en sus procesos y descargan sus aguas residuales contaminadas con este metal.

# **Anexos**



**O. P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO, S.A. DE C. V.**  
PROYECTOS-INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN- PROCESOS-OBRA CIVIL-MECANICA- ELECTRICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICOS, FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

IRAPUATO, GTO. 2019-05-14.

FO. 781-01  
de CE APROBADO

ITESA  
CUIZEO No. 401  
COL. CUIZEO DE LOS NARANJOS  
ABASOLO, GTO.  
TEL.: 045 429 101 60 82

ATN: C. ARELI AVILES MARTÍNEZ Y/O C. CYNTHIA GONZÁLEZ GONZÁLEZ

**INFORME DE RESULTADOS.**

PRESENTAMOS A USTED EL RESULTADO DEL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO REALIZADO A MUESTRA DE "AGUA IDENTIFICADA COMO MUESTRA M 2", TOMADA POR EL CLIENTE Y RECIBIDA POR EL LABORATORIO EL 2019-05-07.

FOLIO DE IDENTIFICACIÓN:  
No DE CONTROL: LA191677

OPAR-190642

HOJA 1 DE 1

**MUESTRA M 2**

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	PINX-AA-028-SCF1-2001 VOLUMÉTRICO	2019-05-07	M GONZÁLEZ	200 mg/L	129.50 mg/L

NOTAS: LAS ESPECIFICACIONES FUERON TOMADAS DE ACUERDO A LO ESPECIFICADO EN LA NORMA NOM-001-SEMARNAT-1996

SIN OTRO PARTICULAR DE MOMENTO Y AGRADECIENDO SU PREFERENCIA, QUEDAMOS DE USTED COMO SUS SEGUROS SERVIDORES.

ING. DEYANIRA PÉREZ GONZÁLEZ  
CED. PROF. 3151638  
GERENTE DE CALIDAD

OBSERVACIONES: LOS RESULTADOS DE ESTE REPORTE SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS SOBJETIVAS A PRIMERA, PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, SIN LA APROBACIÓN DE O.P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO S.A. DE C.V.

Bld. Paseo Solidaridad No. 10371  
Col. Plan de Guanajuato, C. P. 36510  
Irapuato, Gto.

www.opdistribuidora.com

TEL / FAX: (462) 62 5-01-07, 4-06-86  
6-94-11, 6-73-71  
e-mail: laboratorio@opdistdelbajo.com.mx

Figura A1. Análisis realizados por el laboratorio O.P. Distribuidora del Bajío, S.A de C.V., Irapuato, Gto.



**O. P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO, S.A. DE C. V.**  
PROYECTOS- INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN- PROCESOS-OBRA CIVIL-MECANICA- ELECTRICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICOS, FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

IRAPUATO, GTO. 2019-05-14,

FD 7.8.1.45  
M DE 4/10/04"

ITESA  
CUIZEO No. 401  
COL. CUIZEO DE LOS NARANJOS  
ABASOLO, GTO.  
TEL.: 045 429 101 60 82

AT'N: C. ARELI AVILES MARTÍNEZ Y/O C. CYNTHIA GONZÁLEZ GONZÁLEZ

**INFORME DE RESULTADOS.**

PRESENTAMOS A USTED EL RESULTADO DEL ANÁLISIS FISICOQUÍMICO REALIZADO A MUESTRA DE "AGUA IDENTIFICADA COMO MUESTRA M2-1", TOMADA POR EL CLIENTE Y RECIBIDA POR EL LABORATORIO EL 2019-05-07.

FOLIO DE IDENTIFICACIÓN: OPAR-190645 HOJA 1 DE 1  
Nº DE CONTROL: LA191680

**MUESTRA M 2-1**

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	NMX-AA-028-SCFI-2001 VOLUMÉTRICO	2019-05-07	M GONZÁLEZ	200 mg/L	71.19 mg/L

NOTAS: LAS ESPECIFICACIONES FUERON TOMADAS DE ACUERDO A LO ESPECIFICADO EN LA NORMA NOM-001-SEMARNAT-1996

SIN OTRO PARTICULAR DE MOMENTO Y AGRADECIENDO SU PREFERENCIA, QUEDAMOS DE USTED COMO SUS SEGUROS SERVIDORES.

ING. DEYANIRA PÉREZ GONZÁLEZ  
CED. PROF. 3151938  
GERENTE DE CALIDAD

OBSERVACIONES: LOS RESULTADOS DE ESTE REPORTE SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS SONETIDAS A FEJERA, PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL SIN LA APROBACIÓN DE O.P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO S.A. DE C.V.

Bld. Paseo Solidaridad No. 10371  
Col. Plan de Guanajuato, C. P. 36510  
Irapuato, Gto.

www.opdistribuidora.com

TEL / FAX: (452) 62 5-01-07, 4-06-86  
6-94-11, 6-73-71  
e-mail: laboratorio@opdistdelbajio.com.mx

Figura A2. Análisis realizados por el laboratorio O.P. Distribuidora del Bajío, S.A de C.V., Irapuato, Gto.



**O. P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO, S.A. DE C. V.**  
PROYECTOS-INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN- PROCESOS-OBRA CIVIL-MECANICA- ELECTRICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICOS, FISICOQUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

IRAPUATO, GTO. 2019-05-14.

FO-T.B.1-01  
No DE REVISIÓN 1\*

ITESA  
CUITZEO No. 401  
COL. CUITZEO DE LOS NARANJOS  
ABASOLO, GTO.  
TEL.: 045 429 101 60 82

AT°N: C. ARELI AVILES MARTÍNEZ Y/O C. CYNTHIA GONZÁLEZ GONZÁLEZ

**INFORME DE RESULTADOS.**

PRESENTAMOS A USTED EL RESULTADO DEL ANÁLISIS FISICOQUÍMICO REALIZADO A MUESTRA DE "AGUA IDENTIFICADA COMO MUESTRA M 3", TOMADA POR EL CLIENTE Y RECIBIDA POR EL LABORATORIO EL 2019-05-07.

FOLIO DE IDENTIFICACIÓN:  
No DE CONTROL: LA191678

OPAR-190643

HOJA 1 DE 1

**MUESTRA M 3**

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO	NMX-AA-028-SCTI-2001 VOLUMÉTRICO	2019-05-07	M.GONZÁLEZ	200 mg/L	119.50 mg/L

NOTAS: LAS ESPECIFICACIONES FUERON TOMADAS DE ACUERDO A LO ESPECIFICADO EN LA NORMA NOM-001-SEMARNAT-1996

SIN OTRO PARTICULAR DE MOMENTO Y AGRADECIENDO SU PREFERENCIA, QUEDAMOS DE USTED COMO SUS SEGUROS SERVIDORES.

ING. DEYANIRA PÉREZ GONZÁLEZ  
CED. PROF. 3151038  
GERENTE DE CALIDAD

OBSERVACIONES: LOS RESULTADOS DE ESTE REPORTE SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS SOMETIDAS A PRUEBA, PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL SIN LA APROBACIÓN DE O.P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO S.A. DE C.V.

Bld. Paseo Solidaridad No. 10371  
Col. Plan de Guanajuato, C. P. 36510  
Irapuato, Gto.

www.opdistribuidora.com

TEL / FAX: (462) 62 5-01-07, 4-06-86  
6-94-11, 6-73-71  
e-mail: laboratorio@opdistdelbajio.com.mx

Figura A3. Análisis realizados por el laboratorio O.P. Distribuidora del Bajío, S.A de C.V., Irapuato, Gto.



**O. P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO, S.A. DE C. V.**  
PROYECTOS- INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN- PROCESOS-OBRA CIVIL-MECANICA- ELECTRICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICOS, FISCOQUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

IRAPUATO, GTO. 2019-05-14.

FO-7.8-1-01  
No. DE REVISIÓN 11

ITESA  
CUIITZEO No. 401  
COL. CUIITZEO DE LOS NARANJOS  
ABASOLO, GTO.  
TEL.: 045 429 101 60 82

AT'N: C. ARELI AVILES MARTÍNEZ Y/O C. CYNTHIA GONZÁLEZ GONZÁLEZ

**INFORME DE RESULTADOS.**

PRESENTAMOS A USTED EL RESULTADO DEL ANÁLISIS FISCOQUÍMICO REALIZADO A MUESTRA DE "AGUA IDENTIFICADA COMO MUESTRA M3-1", TOMADA POR EL CLIENTE Y RECIBIDA POR EL LABORATORIO EL 2019-05-07.

FOLIO DE IDENTIFICACIÓN:  
No DE CONTROL: LA191681

OPAR-190646

HOJA 1 DE 1

**MUESTRA M 3-1**

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO	NMX-AA-028-SCFI-2001 VOLUMÉTRICO	2019-05-07	M.GONZÁLEZ	200 mg/L	47.69 mg/L

NOTAS: LAS ESPECIFICACIONES FUERON TOMADAS DE ACUERDO A LO ESPECIFICADO EN LA NORMA NOM-001-SEMARNAT-1996

SIN OTRO PARTICULAR DE MOMENTO Y AGRADECIENDO SU PREFERENCIA, QUEDAMOS DE USTED COMO SUS SEGUROS SERVIDORES.

ING. DEYANIRA PÉREZ GONZÁLEZ  
CED. PROF. 3151038  
GERENTE DE CALIDAD

OBSERVACIONES: LOS RESULTADOS DE ESTE REPORTE SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS SOMETIDAS A PRUEBA, PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL SIN LA APROBACIÓN DE O.P. DISTRIBUIDORA DEL BAJÍO S.A. DE C.V.

Blvd. Paseo Solidaridad No. 10371  
Col. Plan de Guanajuato, C. P. 36510  
Irapuato, Gto.

www.opdistribuidora.com

TEL / FAX: (462) 62 5-01-07, 4-06-86  
6-94-11, 6-73-71  
e-mail: laboratorio@opdistdelbajio.com.mx

Figura A4. Análisis realizados por el laboratorio O.P. Distribuidora del Bajío, S.A de C.V., Irapuato, Gto.

## Bibliografías

- Argumedo, R., Alarcon, A., Ferrera, R., & Peña, J. j. (2009). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con contaminantes orgánicos e inorgánicos. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*, 258-263.
- Ayala, E. M. (2016). *Reducción de Cr (VI) en agua proveniente de industrias curtidoras del arroyo El Granizo, León, Gto. por Salvinia natans con interacción de Trichoderma*. Abasolo, Guanajuato.: Insituto Tecnológico Superior de Abasolo.
- Błaszczuk, L., Siwulski, M., Sobieralski, K., Lisiec, J., & Jędryczka, M. (2014). *Trichoderma* spp. – application and prospects for use in organic farming and industry. *Journal of plant protection research*, 309-314.
- Bonilla, S. M. (Mayo de 2013). Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación.
- Cobos, O. F., Londoño, J. F., & Garcia, L. C. (2008). Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las indiuxtrias del curtido de cueros. *Dyna*, 107-108.
- Corona, J. F. (2010). Mecanismos de interacción con cromo y aplicaciones biotecnológicas en hongos. *Revista Latinoamericana de Biotecnología ambiental algal*, 47-60.
- Coto, J. M., Sánchez, I. A., & Pérez, O. C. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azucar*, 52-59.
- Danin, E. A. (2016). *Flora of Israel Online*. Recuperado el 22 de abril de 2018, de <http://flora.org.il/en/plants/SALNAT/>
- Delgadillo, A. E., Ramirez, C. G., & Prieto, F. (2011). Fitorremediación una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 597-605.
- Delira, R. A., Alarcon, A., Cerrato, R. F., & Peña, J. J. (2009). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con contaminantes orgánicos e inorgánicos. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*, 258-263.
- Dhir, B., & Sheela, S. (2011). Heavy metal removal from a multi-metal solution and wastewater by *Salvinia natans*. *Ecological Engineering*, 893-896.
- Dhir, B., Sharmila, P., Pardha, P., & Abdul, S. (2009). Physiologica land antioxidant responses of *Salvinia natans* exposed to chromium-rich wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1790-1797.
- DOF. (2001). *ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA*. Obtenido de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/D088.pdf>

- DOF. (2001). *CALIDAD DEL AGUA - DETERMINACIÓN DE CLORO LIBRE Y CLORO TOTAL- METODO DE PRUEBA*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166806/NMX-AA-108-SCFI-2001.pdf>
- DOF. (2006). *ANÁLISIS DE AGUA – DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO DE NITRITOS EN AGUAS NATURALES Y RESIDUALES –MÉTODOS DE PRUEBA*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166802/NMX-AA-099-SCFI-2006.pdf>
- DOF. (2013). *ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf>
- DOF. (2014). *ANÁLISIS DE AGUA.- MEDICIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS NATURALES, SALINAS, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS- METODO DE PRUEBA*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166148/nmx-aa-044-scfi-2014.pdf>
- Franco, M. A. (2011). CROMO ELEMENTO QUIMICO. *FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES*, 5.
- Garcia, M. O., Collantes, L. T., Castillo, H. R., & Velaquez, M. L. (2008). Biorremediación de cromo VI de aguas residuales de curtiembres por *Pseudomonas* sp y su efecto sobre el ciclo celular de *Allium cepa*. *Revista Medica Vallejana*, 32-34.
- Garcia, M., Alonso, J., Martín, A., & Melgar, M. (2008). Acumulación de cromo en setas silvestres comestibles: factores que influyen en su captacion y repercusiones toxicologicas. *Toxicología*, 38-40.
- González, C. M., Carrillo, G. R., Sánchez, L. A., & Ruiz, O. A. (2017). Alternativas de fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente toxicos. *AgroProductividad*, 9-13.
- Hongn, P., & Vottero, M. E. (2017). Reutilización del agua para la producción sustentable en un establecimiento intensivo porcino. *Facultad de ciencias Agropecuarias*, 11.
- Infante, D., Martinez, B., Gonzalez, N., & Yusimy, R. (2009). Mecanismos de acción de *Trichoderma* frente a hongos fitopatógenos. *Revista Protección Vegetal*, 14-19.
- Jampeetong, A., & Brix, H. (2009). Nitrogen nutrition of *Salvinia natans*: Effects of inorganic nitrogen form on growth, morphology, nitrate reductase activity and uptake kinetics of ammonium and nitrate. *Aquatic Botany*, 67-73.

- López, R. A., Vong, Y. M., Borges, R. O., & Olguin, u. J. (2008). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencias*, 69-82.
- Marrero, J., Díaz, A., & Coto, O. (2010). Mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 67-78.
- Martelo, J., & Borrero, J. L. (2012). Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 221-238.
- Martínez, S. A., Toro, F. M., Rojas, G. G., Giraldo, J. P., & Ángel, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia)*, 12-13.
- Mejía, G. (2008). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 77-94.
- Mendez, N. R., Novelo, L. A., Coronado, P. V., & Castillo, B. E. (2008). Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto. *Ingeniería*, 13-18.
- Molina, N. P., Casas, P. A., & Wandurraga, C. C. (2011). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 81-83.
- Mulca, P. (4 de noviembre de 2013). *PezAdicto.com*. Recuperado el 22 de abril de 2018, de <http://www.pezadicto.com/salvinia-natans/>
- Muñoz, E. (2001). *Biotecnología y sociedad: Encuentros y desencuentros*. Ediciones AKAL.
- Niño, G. E., Barrera, C. A., García, A. B., & Lumbaqué, E. C. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Universidad Militar Nueva Granada*, 306-314.
- Nordberg, G. (2011). Metales: Propiedades químicas y toxicidad. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, 63.15-63.18.
- Panigatti, M. C., Griffa, C., Boglione, R., Gentinetta, F., & Cassina, D. (2012). Uso de *Escherichia coli* para biorremediación de efluentes contaminados por Cr (VI). *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 11-12.
- Peña, S. C. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 7-12.
- Peng, H., Guo, J., Le, B., Liu, Z., & Tao, C. (2018). High-efficient recovery of chromium (VI) with lead sulfate. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 1.
- Pineda, M. E., & Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados, cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg). Mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: Una revisión. *Facultad de ciencias básicas*, 172-190.

- Romero, A. M. (2012). Aplicaciones biotecnológicas de Trichoderma. *Biosaia Revista de los másteres de Biotecnología Sanitaria y Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria de la Universidad Pablo de Olavide*, 13.
- Rubio, D. C., Delgado, D., & Amaya, A. O. (2016). Remoción de metales pesados comúnmente generados por actividad industrial, empleando macrofitas neotropicales. *Producción + Limpia*, 126-140.
- Sandoval, G. M. (2008). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 77-94.
- SEMARNAT. (2012). SEMARNAT. Recuperado el 03 de mayo de 2018, de <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-aguas-residuales>
- Sergio, C., & Jose, P. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 7-21.
- Suárez, P., & Reyes, R. (2008). La incorporación de metales pesados en las bacterias y su importancia para el ambiente. *Interciencia*, 160-163.
- Toro, A. M., & Osorio, C. A. (2012). Trichoderma ssp. Modos de acción, eficacia y usos en el cultivo de café. *Cenicafé*, 4-25.
- Viterbo, A., Malitsky, S., Landau, U., Aharoni, A., & Chet, I. (2010). Trichoderma-Plant Interactions: insights on induced resistance to biotic and abiotic stresses. *Book of Abstracts*, 19.
- Volke, T., & Velasco, J. A. (2002). En T. Volke, & J. A. Velasco, *Tecnologías de remediación para suelos contaminados* (págs. 27-29). México.
- Vullo, D. (2008). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química viva*, 93-102.
- Zevallos, W. T., Loureiro, D., Reeves, M., & Yujnovsky, F. (2016). Evaluación de macrófitas autóctonas de flotación libre para su empleo en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. *Energeia*, 31-36.