

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**Capacidad de Adsorción de Cromo en aguas sintéticas y aguas
residuales de tenería en Semillas trituradas de *Moringa oleifera***

Trabajo Monográfico presentado por:

**Elisa Victoria Rivera
Rolling Steve Martínez Bobadilla**

Para optar por el título de:

Ingeniero Químico

Tutor:

MPhil. Martha Benavente Silva

Managua, Nicaragua, diciembre 2020.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a mis padres, Vicente Bobadilla y Petrona Castillo, por apoyarme siempre en todos mis proyectos, por creer en mí, por darme el tiempo necesario para realizar mis estudios, por hacer muchos sacrificios para que pudiera estudiar mi carrera profesional.

A mis hermanos para que vean en mí un ejemplo de superación, para que se esfuercen por lograr sus metas y continuar su camino hasta alcanzar sus sueños, nunca es tarde para hacerlo.

A mis tías y demás familiares y amigos que de una forma u otra estuvieron ahí cuando más lo necesitaba, dándome la ayuda sin esperar alguna recompensa.

Rolling Steve Martínez Bobadilla

DEDICATORIA

Dedico este proyecto primeramente a Dios por su infinita sabiduría, quien me hizo comprender que todo tiene su tiempo.

A mi madre Natalia Leshechenko, quien es mi soporte en cada aspecto de mi vida por sus infinitos sacrificios, por su amor incondicional, apoyo, cariño y sobre todo por sus consejos.

A mi padre Omar Rivera, a mis hermanos por estar conmigo a lo largo de mi vida y compartir momentos muy especiales.

Al Lic. German Osorio quien a través de sus consejos y oportunidades me ayudo a crecer y desarrollarme en aspectos personales y profesionales. Infinitamente gracias.

A mi compañero de tesis, Rolling Martínez por su perseverancia, dedicación y esfuerzo en la realización de este trabajo.

A mi tutora Mphil. Martha Benavente, por su gran apoyo, orientación y motivación en momentos cruciales durante el desarrollo de este trabajo, gracias profe. Al Ing. Arnoldo Hidalgo, Ing. Juan Alonso e Ing. Onell Morales por su confianza, recomendaciones e infinita disposición para ayudarnos en cada momento que necesitábamos.

Al Ing. Sergio Gámez Guerrero por habernos incursionado en el desarrollo de este trabajo, recomendaciones y asesorías.

Al flaco, William Rivas por estar a mi lado en cada momento, por su amor, comprensión, tolerancia y apoyo incondicional.

Un especial agradecimiento a la Ing. Maritza Sánchez (Q. E. P. D) por su ayuda incondicional y comprensión durante mis estudios en la facultad.

A cada profesor de la facultad de Ingeniería Química por sus enseñanzas, oportunidades y amistad.

A mis amigos por estar siempre pendiente. Muchas gracias a todos por su tiempo, disposición y ayuda.

Elisa Victoria Rivera

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por permitirnos seguir adelante a pesar de las dificultades, solo él nos da la fuerza y el valor de seguir en nuestro camino sin retroceder.

Les agradecemos especialmente a las siguientes personas:

Al Ing. Arnoldo Hidalgo responsable de laboratorio de Ingeniería Ambiental de la FIQ-UNI, sin su apoyo y orientaciones hubiese sido difícil realizar los experimentos.

Al Ing. Juan Alonso por ayudarnos de forma incondicional con los experimentos y preparación de equipos, por sus consejos y observaciones realizadas.

A la Mphil. Martha Benavente, nuestra tutora de este trabajo investigativo, por su paciencia y disposición de guiarnos y centrarnos en el camino que debimos tomar en las investigaciones.

De manera especial a la **Vicerrectoría I+D+i** por el apoyo financiero para llevar a cabo este trabajo.

A nuestros centros de trabajos: **Auditorías Contables y de Campo S.A**, con especial mención al Lic. German Osorio Duran por brindarnos su asesoría y apoyo financiero. A **Electroquímica de Nicaragua S.A** bajo la dirección del Lic. Alfredo Sáenz por dar el tiempo necesario para realizar las investigaciones y estar siempre dispuesto a apoyar el crecimiento profesional de sus colaboradores.

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA

El trabajo de Diploma realizado por los Bachilleres Elisa Victoria Rivera y Rolling Steve Martínez Bobadilla titulado "**Capacidad de Adsorción de Cromo en aguas sintéticas y aguas residuales de tenería en Semillas trituradas de Moringa Oleífera**", es una importante contribución, desde el campo de la Ingeniería Química, en la búsqueda de biomateriales eficaces para la remoción de metales pesados, contribuyendo de esta manera, a mejorar la calidad de las aguas residuales y naturales.

Los desechos de las empresas agrícolas pueden ser aprovechados y aplicados en diferentes áreas tales como la agroindustria, textil, alimenticia y en sistemas de tratamiento de agua, en vez de conducir al detrimento ambiental y la calidad de vida. Con este trabajo se pretende sentar las bases para el uso de material biológico de bajo costo, accesible, fácil de preparar y que no use reactivos químicos para su obtención.

En el desarrollo de este trabajo, los Bachilleres Elisa Victoria Rivera y Rolling Steve Martínez Bobadilla tuvieron que utilizar múltiples conceptos y destrezas aprendidos durante su formación como ingenieros químicos, mostrando independencia, buena organización, responsabilidad, una gran capacidad de trabajo y destreza en la resolución de problemas de carácter práctico, logrando con ello obtener excelentes resultados y demostrando que la semilla de *moringa oleífera* es un bioadsorbente eficaz en la remoción de cromo hexavalente de aguas residuales de tenería.

Como catedrático guía considero que este trabajo cumple con la calidad científica requerida, por lo que solicito a los honorables miembros del tribunal examinador evaluar el gran esfuerzo desarrollado y otorgar los Bachilleres Elisa Victoria Rivera y Rolling Steve Martínez Bobadilla el título de Ingeniero Químico.

MPhil. Lic. Martha Benavente Silva

Tutora del estudio,
Profesora Titular, UNI- FIQ

RESUMEN

El estudio se realizó en el Laboratorio de Química Ambiental de la Facultad de Ingeniería Química, en el periodo comprendido entre Noviembre 2019 y Mayo 2020. La semilla de *Moringa oleífera* fue recolectada en el municipio de Chichigalpa, Chinandega, seleccionada, triturada, secada y tamizada con el objetivo de tener un tamaño de partícula de 0.22 a 0.32 mm.

Para evaluar la capacidad de adsorción de semilla de *Moringa oleífera* en la remoción de cromo hexavalente en un intervalo de pH de 4 a 7, se prepararon muestras de agua a nivel de laboratorio a una concentración aproximada de 50 mg/L de cromo hexavalente, en contacto con dos masas de adsorbente de 0.5 y 1.5 g a una velocidad de agitación de 450 rpm. Los resultados mostraron que el pH tiene muy poco efecto en la remoción de cromo hexavalente, independientemente de la masa de bioadsorbente empleada en los experimentos, con porcentajes de remoción mayores al 99.8%.

Para la determinación de las isotermas, se prepararon muestras de agua con concentraciones de cromo hexavalente de 5 a 500 mg/L y de 1,000 a 5,000 mg/L, con las mismas condiciones de operación utilizada a un pH de 4 y masa de adsorbente de 0.5 y 1.5 g. Los resultados mostraron que el coeficiente de correlación (R^2) fue mayor, en todos los casos, para el modelo de Freundlich que para el modelo de Langmuir, indicando que, bajo estas condiciones de trabajo, este modelo es el que mejor describe los datos experimentales de la adsorción del cromo VI usando semilla de *Moringa oleífera* como adsorbente. La capacidad máxima de adsorción, $q_{e,max}$, de cromo VI en la semilla de *Moringa oleífera* fue de 2,000 mg/g, usando una masa de adsorbente de 0.5 g.

Así también, se comprobó la eficacia de la semilla de *Moringa oleífera* al aplicar el tratamiento propuesto a aguas residuales provenientes de una Tenería localizada en el barrio Sutiava, de la Ciudad de León, con una concentración inicial de cromo hexavalente de 0.158 mg/L y un pH de 2.10. Las muestras fueron sometidas al proceso de adsorción a dos diferentes masas de adsorbente de 0.5 g y 1.5 g, a un pH ajustado de 4.0. Las concentraciones finales determinadas fueron de 0.0145 mg/L (para una masa de 0.5 g) y 0.0088 mg/L (para una masa de 1.5 g). Ambos resultados se encontraron por debajo de los límites permisibles de 0.1 mg/L (Decreto 21-2017, Arto. 47), con un rendimiento del 90.8% y 94.4 %, respectivamente.

El estudio demuestra que la semilla de *Moringa oleífera* es muy efectiva para la remoción de cromo hexavalente, alcanzando valores de remoción muy superior a los esperados, cumpliendo con los valores límites permitidos para aguas residuales provenientes de la industria del curtido de pieles según Decreto 21-2017 de la normativa vigente en Nicaragua.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA.....	5
RESUMEN	6
TABLA DE CONTENIDO.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 Generalidades de la <i>Moringa oleífera</i>	16
3.1.1. Origen	16
3.1.2. Características Ecológicas de la Especie.....	16
3.1.3. Usos y Aprovechamientos de la Semilla	17
3.1.4. Consumo Humano	17
3.1.5. Uso Bioenergético – Biodiesel.....	17
3.1.6. Depuración de Aguas.....	17
3.2. Semilla de <i>Moringa oleífera</i> en el proceso de tratamiento de agua	18
3.3. Aguas Residuales	19
3.3.1 Fuentes de aguas residuales	19
3.3.2 Características de los efluentes residuales	20
3.4. Aguas residuales de la Industria de Tenería.....	20
3.5. Impactos de la actividad de tenería en el medio ambiente	21
3.5.1. Contaminación de Recursos Hídricos	22
3.5.2. Contaminación Humana	23
3.6. Regulaciones Ambientales de Aguas Residuales de Tenería en Nicaragua	23

3.7. Cromo	24
3.7.1. Generalidades y Características del Cromo	24
3.7.2. Fuentes y exposición potencial	24
3.7.3. Toxicidad del Cromo	25
3.7.4. Forma de Ocurrencia: Especies Acuósas de Cromo.....	26
3.8. Adsorción.....	28
3.8.1. Tipos de Adsorción.....	29
3.8.2. Parámetros que Influyen en el Proceso de Adsorción.....	30
3.9. Isotermas de Adsorción	31
3.9.1. Isotermas de Freundlich	31
3.9.2. Isotermas de Langmuir.....	32
4. METODOLOGÍA.....	34
4.1. Universo	34
4.2. Materiales.....	34
4.2.1. Semillas de <i>Moringa oleífera</i>	34
4.2.2. Reactivos y Equipos de Laboratorio.....	34
4.3. Determinación de las Propiedades de la <i>Moringa oleífera</i>	34
4.3.1. Preparación de las Semillas de <i>Moringa oleífera</i>	34
4.3.2. Determinación de la Densidad Aparente	36
4.3.3. Determinación de la Densidad Real	36
4.3.4. Porosidad Total	37
4.3.5. Análisis espectral de la <i>Moringa oleífera</i>	37
4.4. Efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de Cr (VI)	37
4.5. Determinación de las isotermas de Cromo VI en semillas de <i>Moringa oleífera</i>	38
4.6. Aplicación de los bioadsorbentes a aguas residuales de tenería	39
4.7. Diseño Experimental	39
4.7.1 Determinación del pH de máxima adsorción del Cr VI	39
4.7.2. Determinación de Isotermas del Cromo.....	40
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
5.1 Propiedades de la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	42
5.1.1 Proceso de preparación de semilla de <i>Moringa oleífera</i>	42
5.1.2 Caracterización química de la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	43

5.1.3 Determinación de la Densidad Aparente	43
5.1.4 Determinación de la Densidad Real	44
5.1.5 Porosidad total de la semilla de <i>Moringa oleifera</i>	44
5.1.6 Caracterización por Análisis Espectral	45
5.2 Influencia del pH en la adsorción de cromo VI	46
5.3. Determinación de las Isotermas de adsorción de cromo VI	48
5.4. Adsorción de cromo hexavalente de aguas residuales de tenería	52
6. CONCLUSIONES	54
7. RECOMENDACIONES	55
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.	Descripción	Página
3.1	Contenidos aproximados de contaminantes en las aguas residuales de curtiembre.	21
3.2	Artículo 47, Decreto Ejecutivo No. 21-2017. Rangos y límites permisibles de aguas residuales provenientes de la industria de curtidos en Nicaragua.	24
3.3	Principales reacciones en equilibrio del Cr (VI) (González y Gutiérrez, 2014).	27
4.1	Descripción de los parámetros establecidos para la determinación del pH de máxima adsorción.	40
5.1	Balance de la materia prima en la preparación de la semilla de <i>M.O</i>	42
5.2	Principales componentes de la semilla de <i>Moringa oleífera</i> triturada.	43
5.3	Densidad aparente de la semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i> .	43
5.4	Densidad real de la semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i> .	44
5.5	Densidad de conjunto, partícula y porosidad de la <i>Moringa oleífera</i> .	44
5.6	pH de adsorción de algunos adsorbentes provenientes de desechos agrícolas usados para la remoción de cromo hexavalente.	48
5.7	Parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo hexavalente a diferente masa de adsorbente.	50
5.8	Parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo hexavalente a diferente masa de adsorbente en un intervalo de concentración inicial de 1000 a	52

	5000 mg/L.	
5.9	Resultados del proceso de adsorción de cromo hexavalente usando aguas residuales de tenería a diferentes masas de adsorbente.	53
A.1	<i>Equipos de Laboratorio.</i>	61
A.2	<i>Reactivos.</i>	61
A.3	<i>Materiales y Cristalería de Laboratorio</i>	62
A.4	Diseño Experimental para el estudio del efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de cromo hexavalente en <i>Moringa oleifera</i> .	64
A.5	Diseño Experimental para el estudio de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente en <i>Moringa oleifera</i> , a diferentes masas y diferentes concentraciones iniciales del ion metálico.	65
A.6	Datos experimentales del estudio de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente en <i>Moringa oleifera</i> , a diferentes masas de adsorbente y en intervalo de concentración de 5 a 500 mg/L.	66
A.7	Datos experimentales del estudio de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente en <i>Moringa oleifera</i> , a diferentes masas de adsorbente y en intervalo de concentración de 1000 a 5000 mg/L.	66
A.8	Densidades del agua a diferentes temperaturas.	67
A.9	Datos de Volúmenes del picnómetro	68
A.10	Equipo, Materiales y Reactivos para la determinación del pH.	69
A.11	Datos de absorbancia en función de la concentración de cromo VI.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.	Descripción	Página
3.1	Diagrama Eh-pH para especies inorgánicas de cromo (González y Gutiérrez, 2014).	27
3.2	Diferentes procesos de sorción. Appelo y Postma (1993).	28
3.3	Representación Esquemática de los procesos de adsorción. (Appelo y Postma, 1993).	29
5.1	Comparación de los espectro IR de la semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i> sin y con cromo hexavalente.	45
5.2	Porcentaje de remoción de cromo hexavalente a diferentes masas de bioadsorbente en un rango de pH de 4 a 7.	46
5.3	Isotermas de adsorción de cromo VI usando diferentes masas de <i>Moringa oleífera</i> como adsorbente en un intervalo de concentración inicial de 5 a 500 mg/L.	48
5.4	Isotermas de adsorción de cromo VI en semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i> aplicando los modelos linealizados de Freundlich y Langmuir.	49
5.5	(a) Isotermas de adsorción de cromo VI usando diferentes masas de adsorbente en un intervalo de concentración inicial de 1000 a 5000 mg/L, (b) datos ajustados al modelo linealizado de Freundlich y (c) datos ajustados al modelo linealizado de Langmuir.	51
A.1	Diagrama de flujos del proceso de preparación de la semilla de <i>Moringa oleífera</i> .	63
A.2	Curva de calibración de absorbancia en función de la concentración de cromo hexavalente.	72

1. INTRODUCCIÓN

Se considera que el agua destinada al consumo y a la preparación de los alimentos (agua potable), debe estar exenta de sustancias minerales y organismos que puedan ocasionar daños perjudiciales a la salud. No obstante, actualmente se estima que 1.1 billón de personas no tiene acceso a agua potable (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2007), donde un gran porcentaje habita en las regiones rurales de países en desarrollo.

En las zonas rurales del pacífico de Nicaragua, el suministro de agua para consumo humano lo proporcionan las fuentes subterráneas, donde el agua es extraída, en su mayoría, de pozos artesanales. Por lo general, el agua es consumida por la población sin ningún tipo de tratamiento de potabilización que garantice la remoción de componentes biológicos, orgánicos e inorgánicos hasta el valor máximo aceptable (Altamirano, 2005). Sin embargo, las aguas subterráneas, en muchas zonas de Nicaragua, contienen metales pesados cuya concentración sobrepasa a la recomendada por las normas CAPRE para aguas de consumo humano (UNICEF, 2002).

La industria curtiembre es una de las principales fuentes que genera contaminación por cromo. Las sales de cromo trivalente, como $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$, se han utilizado en esta actividad para evitar la biodegradación de las moléculas de colágeno, constituyentes del cuero. Por lo general, las pieles previamente condicionadas son remojadas en una solución cuya concentración es de alrededor de 20 g de Cr_{3+}/L ; la solución al final del proceso aún contiene una cantidad apreciable de cromo (~4000 mg/L) (López, 2012)

En la actualidad existen evidencias que diversos compuestos de cromo, son contaminantes ambientales en los recursos hídricos, suelos y efluentes de industrias. Esto se debe a la amplia utilización de este elemento en diversas actividades, tales como cromado electrolítico, fabricación de explosivos, curtido de pieles, aleación de metales, fabricación de colorantes y pigmentos (González y Gutiérrez, 2014).

El manejo inadecuado de los efluentes de estas industrias, las cuales en su mayoría son artesanales, podría causar contaminación de las aguas superficiales y subterráneas con metales pesados, causando un problema a la sociedad, al no contar con fuentes de aguas lo suficientemente aptas para el consumo humano.

Uno de los mecanismos usados para la remoción de metales pesados de soluciones acuosas, es la adsorción. Muchos investigadores han hecho estudios utilizando diferentes tipos de materiales adsorbentes para la remoción de metales pesados de

las aguas, obteniendo buenos resultados en cuanto a su capacidad de remoción. En este método se han utilizado materiales bioadsorbentes, entre ellos se encuentran: quitosano (Romero y Sánchez, 2018), biomasa de tamarindo (Rodas y Ñurinda, 2016) y bentonita termo-activada (González y Gutiérrez, 2014).

Aunque la *Moringa oleífera* no ha sido estudiada en Nicaragua como material bioadsorbente, se ha demostrado que es excelente para remover arsénico y plomo (Hernández, Rivas y Ventura, 2017), destacándose entre los bioadsorbentes antes mencionados, por su fácil obtención y bajo costo.

En las investigaciones que han utilizado la *Moringa oleífera* como bioadsorbente, muy pocas veces se han enfocado en el estudio de los mecanismos de adsorción para encontrar las características que posee la semilla relacionadas con la capacidad de adsorción, no solo de metales pesados sino también de halógenos presentes en las aguas. En un estudio realizado por Hernández, Rivas y Ventura (2017), se comprobó que el uso de la semilla de *Moringa oleífera* en el tratamiento de aguas para consumo humano permitió una remoción del 82% de arsénico y 98% de plomo.

Por su parte, en un trabajo realizado por López (2018), se evaluó el uso de la moringa para la remoción de flúor. Así mismo, se determinó las características de la semilla tales como la porosidad, grupos funcionales y tamaños de partículas pequeños. Los resultados mostraron que este material posee las condiciones favorables para usarse en procesos de adsorción y no solo como coagulante.

Teniendo en cuenta lo anterior, se consideró investigar la aplicación de la *Moringa oleífera* en la remoción de cromo hexavalente. Los resultados de este estudio permitirán determinar las condiciones adecuadas para emplear la semilla de *Moringa oleífera* como un efectivo removedor de Cromo Hexavalente de aguas residuales de tenerías y su uso a pequeña escala industrial. De esta manera, se crea una alternativa para solucionar un problema actual de contaminación debido a la falta de tratamiento de los efluentes.

Así mismo, con estos resultados se abren nuevos caminos para futuros estudios que indaguen sobre nuevos materiales adsorbentes, que puedan ser amigables con el ambiente, de bajos costos operativos y de fácil manejo, contribuyendo al desarrollo de la investigación y la docencia en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar la capacidad de adsorción de cromo hexavalente de aguas sintéticas y aguas residuales de tenería en semillas trituradas de *Moringa oleífera* a nivel de laboratorio.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas de la semilla de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite, recolectadas en el municipio de Chichigalpa, Chinandega.
- Determinar el efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de cromo hexavalente en semilla de *Moringa oleífera* con un tamaño de partícula de 0.22 – 0.32 mm, en un rango de pH de 4 a 7.
- Evaluar la isoterma de adsorción del cromo hexavalente con semilla triturada de Moringa a diferentes concentraciones y diferentes masas de adsorbente, empleando las ecuaciones de Langmuir y de Freundlich.
- Establecer la eficacia de la semilla de la *Moringa oleífera* para la remoción de cromo hexavalente de las aguas residuales de tenerías a nivel de laboratorio.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta las generalidades de la planta *Moringa oleifera*, sus características, aplicaciones y su viabilidad como agente absorbente para la remoción de cromo.

Así también, se incluye literatura relacionada al equilibrio y la cinética de absorción para determinar la capacidad absorbente de la semilla triturada de *Moringa oleifera* junto con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos los cuales determinan la calidad de agua para su consumo.

3.1 Generalidades de la *Moringa oleifera*

3.1.1. Origen

Moringa oleifera es un árbol nativo del norte de la India y la región sur asiática, que crece en regiones tropicales y subtropicales y se cultiva en muchas partes del mundo. La planta prospera mejor en las condiciones de clima tropical insular, puede crecer bien en los trópicos húmedos o tierras cálidas secas y aguanta bien las sequías. En América latina y Centroamérica se introdujo en 1920 como un árbol Ornamental y fue utilizado como cercas vivas y cortinas rompe-vientos (Martínez y Talavera, 2018).

3.1.2. Características Ecológicas de la Especie

El marango (*Moringa oleifera* L.) se encuentra diseminado en gran parte del planeta. Se encuentra en áreas desde el nivel del mar hasta los 1,800 m.s.n.m. y se puede reproducir por semillas o por estacas (Arias, 2014).

El árbol alcanza de 7 a 12 metros de altura y 20 a 40 cm de diámetro, con una copa abierta, tipo paraguas, hojas compuestas, alternas tripinadas con una longitud total de 30 a 70 cm. Frutos en cápsula trilobulada de 20 a 40 cm longitud, contienen de 12 a 25 semillas por fruto, las semillas son de forma redonda y color castaño oscuro con 3 alas blanquecinas, cada árbol puede producir 15,000 a 25,000 semillas por año.

Tiene una alta tasa de crecimiento y capacidad para producir altas cantidades de materia fresca por metro cuadrado con altas densidades de siembra. Es muy importante señalar el alto rendimiento de materia seca, 5.16 ton/ha/año en ocho cortes por año que se pueden realizar.

El marango posee un alto contenido de proteínas en sus hojas, ramas y tallos. El análisis proteico promedio en materia seca es: hojas 28-30%, ramas y tallos 8%. La planta entera, en masa seca tiene un 10% de azúcar y un 8% de almidón. Sus frutos y flores contienen vitaminas A, B y C y proteínas. Las semillas tienen entre un 30-42% de aceite y su torta contiene un 60% de proteínas. No contienen toxinas conocidas.

3.1.3. Usos y Aprovechamientos de la Semilla

A continuación, se expondrán los diversos usos que proporciona la semilla de *Moringa oleífera*. Las semillas de la *Moringa oleífera* probablemente sean la parte de la planta a la que se le atribuyen mayor número de usos y propiedades.

3.1.4. Consumo Humano

Las semillas de moringa contienen entre un 33 y 41% de aceite, el cual se caracteriza por tener una importante proporción de ácido oleico, entre un 68-85%, (muy similar al aceite de oliva, que contiene entre un 65-86%).

Así también, contiene ácido behénico ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$), un compuesto que puede ser parcialmente absorbido por el intestino humano (< 20%). Este efecto de baja absorción hace que la densidad calórica por gramo de aceite sea menor que otros (Foidl, Mayorga y Vásquez, 1999; Paz y Del Bosque, 2011; Pérez, 2012).

3.1.5. Uso Bioenergético – Biodiesel

Falasca y Bernabé (2008) consideran que es un cultivo atractivo para la producción de biodiesel, fundamentalmente porque sus semillas contienen un 31-47% de aceite. Ese alto tenor de ácido oleico significa que ese aceite es adecuado para obtención de biodiesel, con un bajo tenor de insaturación. Ello indica su buena calidad por su estabilidad a la oxidación, facilitando el transporte y almacenamiento.

El aceite, además, puede ser empleado para consumo humano, fabricación de jabones, cosméticos, como lubricante de relojes. La torta se puede emplear como fertilizante ya que es rica en nitrógeno.

3.1.6. Depuración de Aguas

Las semillas de la moringa son un floculante natural. Poseen un alto contenido de proteínas catiónicas, las cuales son solubles en agua, con carga neta positiva y bajo peso. Actúan como los polímeros sintéticos utilizados industrialmente en el tratamiento de aguas. Este floculante actúa neutralizando y desestabilizando las

cargas negativas de las partículas coloidales en suspensión, provocando que se agreguen entre sí y precipiten al fondo (Folkardy Sutherland, 1996; Tenorio *et al.*, 2008).

En un proyecto de investigación realizado en el Laboratorio de Microbiología y Parasitología de la UNAN-Managua y en el Laboratorio Nacional de Residuos Biológicos del MAGFOR, se determinó la eficacia de la semilla del árbol *Oleífera* para el aclaramiento del agua por medio de la comparación de los aspectos microbiológicos y fisicoquímicos del agua del Lago de Nicaragua (obtenida en la comarca de El Menco, Rivas), antes y después del tratamiento con una dosis de 1000 mg/L de la semilla de *M. oleífera*. (Hernández, Cawish, Gómez y González, 2016)

El examen fisicoquímico no demostró variaciones en las concentraciones de iones presentes en el agua pre y pos-tratamiento con la semilla. Los exámenes microbiológicos revelaron que *M. oleífera* es capaz de inhibir el crecimiento de *Salmonella choleraeruis* del grupo C1 en Mac Conkey agar y *Staphylococcus Spp.* En agar sangre, así como *Escherichiacolienteropatígena* en Sorbitol Mac Conkey agar.

La observación al fresco del agua pretratamiento y pos-tratamiento del agua con la semilla mostró una remoción total de microorganismos. La dosis ideal para clarificar las aguas de Lago Cocibolca fue de 1000 mg/L con un tiempo de exposición a la semilla de media hora.

3.2. Semilla de *Moringa oleífera* en el proceso de tratamiento de agua

El agua natural siempre contiene partículas e impurezas de diversos orígenes. Con carga superficial negativa que les impide aproximarse unas a otras confiriéndoles estabilidad y permitiéndoles permanecer indefinidamente en el medio acuático. Para que estas impurezas puedan ser removidas, se deben de aplicar sustancias capaces de remover electronegativa de las partículas presentes en el agua (Barrenechea, 2005).

Diversos estudios se han enfocado en las funcionalidades de las proteínas de las semillas de *Moringa oleífera*, como agente coagulante en el tratamiento de agua; así como también, otros estudios se enfocaron en la purificación y la caracterización de los compuestos activos de la semilla, que se utilizan para la purificación de aguas turbias incluyendo su uso como removedores de arsénico en aguas para consumo humano. Estos últimos estudios han sido de alto interés para determinar los mecanismos de coagulación y adsorción, los cuales pueden ser comparados con el sulfato de aluminio.

Se ha comprobado que el marango puede ser utilizado para el tratamiento de agua con cáscara o sin cáscara. La acción del marango en el agua se debe a la presencia de proteínas catiónicas solubles. Las proteínas están densamente cargadas con un peso molecular de 13 Kda. La absorción-neutralización de cargas son los principales mecanismos de coagulación presentes en el tratamiento con marango (Ndabigengesere *et al.* 1995).

En un estudio comparativo del sulfato de aluminio y las semillas del marango para la depuración de aguas con baja turbiedad realizado en la laguna de Jiqui, estado del Rio Grande del Norte, Brasil, se encontró que las semillas del marango tienen una eficiencia ligeramente inferior que la observada con el sulfato de aluminio (Ledo, Lima, Paulo y Duarte, 2009).

Lo anterior, junto con otros estudios realizados a partir de la década de los 80, justifica el uso de las semillas del marango como coagulante para el tratamiento de agua (Ortega, 2014).

Las semillas de *Moringa oleífera* son utilizadas comúnmente en áreas rurales de países africanos como Nigeria, Malí, Kenya, Senegal y Sudán para la clarificación de agua para consumo (Rodríguez, Muñoz, García y Elina, 2005).

3.3. Aguas Residuales

Las aguas residuales pueden ser derivadas de la actividad industrial y/o de los residuos domésticos; estos, por razones de salud pública, no pueden ser vertidos a los cursos de aguas corrientes o lagos sin que se les dé un tratamiento previo.

Sin embargo, a pesar de las recomendaciones hechas por los entes ambientales, en los últimos años los ambientes naturales han recibido un creciente aporte de efluentes industriales y domésticos que han llevado al deterioro de la fauna y flora (Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012).

3.3.1 Fuentes de aguas residuales

Según un artículo emitido por el Centro de Producción más Limpia CNPML (2007), dentro de las fuentes de aguas residuales podemos encontrar las siguientes:

Aguas domésticas o urbanas: Son los vertidos que se generan en los núcleos de población urbana como consecuencia de las actividades propias de éstos. Los aportes que generan esta agua son: aguas negras o fecales, aguas de lavado doméstico.

Aguas pluviales: Estas aguas provienen del sistema de drenaje de calles y avenidas, producto de lluvias o lixiviados (A menudo se les ve como parte de aguas domésticas). En los países desarrollados esta agua nunca entra a las plantas de tratamiento de agua residual.

Aguas residuales industriales: Son aquellas que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otro, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

Uno de los compuestos contaminantes más comunes en dichos efluentes, es el cromo (VI), el cual proviene de las aguas residuales de industrias como:

- Industria metalúrgica: en la manufacturación de acero inoxidable y aleaciones, Cromado frente a la corrosión.
- Industria química: en catalizadores, pigmentos para plásticos, barnices, pinturas, tintas de imprenta, vidriado de la porcelana y coloreado de vidrio, como mordiente en la tinción y en curtido del cuero.
- Como conservador de la madera.
- Industria refractaria.
- Fotografía y fotograbado.
- Sistemas de enfriamiento de calderas, como anticorrosivo.

3.3.2 Características de los efluentes residuales

Los efluentes industriales se caracterizan por ser altamente contaminantes, algunos de ellos poseen bajos niveles de nutrientes, así como pH bajos o altos, también pueden contener sustancias tóxicas (Pardo, 2013).

3.4. Aguas residuales de la Industria de Tenería

Esta industria procesa las pieles de animales, generalmente bovinos, para transformarlas por medio de agentes químicos, en un producto conocido como cuero, inalterable e imputrescible con el tiempo. Los vertidos de estos procesos se originan cuando se realizan las operaciones propias del proceso productivo, tales como el curado, descarnado, lavado, remojo, eliminación de pelo, maceración, piquelado, desengrasado, curtido con cromo, raspado, impregnación con grasa y teñido (Pardo, 2013).

A la salida del proceso, entre las sustancias que contienen las aguas residuales de una curtiembre se encuentran cloruros, sulfatos alifáticos, condensados de ácido acrílico, polifenoles, ácidos grasos, tintas, proteínas, carbohidratos solubles y sulfuros de sodio (Murugananrhan y Raju, 2004).

Estos efluentes están generalmente caracterizados por presentar baja biodegradabilidad, alto contenido de sólidos suspendidos y materia orgánica (especialmente durante el pelambre), elevado contenido de nitrógeno, pero bajos niveles de fósforo. En la Tabla 3.1 se presentan los contenidos aproximados de contaminantes en las aguas residuales de curtiembre.

La DQO de un agua residual de una tenería oscila 1500 y 35000 mg/L. Esta materia orgánica es de naturaleza particulada, adicionalmente, estos efluentes son muy cambiantes dependiendo del origen y la naturaleza de las pieles (Pardo, 2013).

A su vez se caracteriza por tener elevadas concentraciones de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) que varían en el rango de 300 y 3000 mg/L. Es importante destacar que los efluentes de las tenerías se caracterizan por su alto contenido de sólidos suspendidos que oscilan entre 1000-6100 mg/L. Otros de los contaminantes propios de este tipo de efluente son los sulfuros y cloruros que pueden variar entre 120 y 1200 mg/L y entre 2000 y 21000 mg/L, respectivamente (Pardo, 2013).

Tabla 3.1 Contenidos aproximados de contaminantes en las aguas residuales de curtiembre.

Parámetros	Concentración (mg/L)
Sólidos Totales	6,000 - 8,000
NaCl	3,000
DBO	900
Dureza Total	1,600
Sulfuros	120
Proteínas	100
Cromo Total	30 – 50

3.5. Impactos de la actividad de tenería en el medio ambiente

Este tipo de industria constituye un sector altamente contaminante para el medio ambiente, ya que, en los procesos, se generan desechos orgánicos y químicos, que no reciben un tratamiento adecuado.

Según estudios realizados por Mi Pequeña y Mediana Empresa [MIPYME] para sector de las tenerías, señalan que los vertidos producto de esta actividad tienen una alta incidencia sobre la calidad de los cuerpos receptores, debido a altos valores de sólidos suspendidos, aumento de la DBO, grasas y concentraciones de Cr (VI), el cual es un elemento altamente tóxico.

Los impactos producidos en un cuerpo de agua se pueden enumerar como reducción de los niveles de oxígeno, variaciones en el pH, alteración del equilibrio microbiológico, cambio de color, aumento de nutrientes, generación de sales disueltas y turbidez.

Dentro de los desechos se encuentran los residuos provenientes de la operación de desencarnado y pelambre (carnaza, pelos, grasa) y los residuos de efluentes con sales de cromo trivalente, en el curtido (Centro de Producción más Limpia [CPML], 2008).

Las grandes fluctuaciones en la naturaleza provenientes de los residuos de las curtidurías, debidas a descargas intermitentes, hacen que sean difíciles de tratar, especialmente en combinación con las aguas residuales urbanas. Los impactos producidos por la actividad tenería, son las siguientes (Raisman y Gonzales, 2002) se presentan a continuación.

3.5.1. Contaminación de Recursos Hídricos

En el caso de las aguas subterráneas, su contaminación es más problemática y persistente porque su autodepuración es lenta debido a que no presenta corrientes que le confieran una adecuada aireación. Esto se agrava cuando es la única fuente de abastecimiento de agua para una población. Los efluentes no tratados de las curtiembres ocasionan salinidad en las aguas subterráneas debido a la alta concentración de cloruros (Fernández, 2015).

Una evaluación sobre el potencial de contaminación de cuerpos de agua causada por efluentes de curtiembre en función de sus características principales, muestra lo siguiente:

- **DBO y DQO:** Son los parámetros utilizados para medir la materia orgánica presente en el efluente. Cuando se presenta concentraciones altas de DBO y DQO en los ríos puede ocurrir desoxigenación de este.
- **pH:** Es un parámetro de importancia que indica la intensidad de la acidez o alcalinidad del efluente. Generalmente los efluentes de las curtiembres presentan

variaciones entre 2,5 y 12,0. Las variaciones de pH afectan considerablemente la vida acuática de las corrientes receptoras.

- **Sulfuro:** Presenta riesgo de formación de gas sulfhídrico, el que en baja concentración genera olor desagradable y en alta concentración puede ser muy tóxico.
- **Amonio:** Es tóxico para los peces. Es un nutriente que puede causar proliferación de plantas acuáticas.
- **Nitrógeno:** Es el total de nitrógeno orgánico y del amoniacal. Su presencia en altas concentraciones puede provocar el crecimiento acelerado de plantas acuáticas.
- **Nitratos:** Su presencia en altas concentraciones en agua potable es riesgosa para la salud.
- **Fosfato:** No es tóxico, pero estimula el crecimiento de plantas acuáticas y algas.
- **Cromo:** Metal pesado persistente que puede causar problemas a la salud humana en altas concentraciones.
- **Color:** Proveniente de los taninos y tintes, perjudica la actividad fotosintética de las plantas acuáticas y provoca su muerte.
- **Sólidos sedimentables:** Ocasionan la formación de bancos de lodos que producen olores desagradables.

3.5.2. Contaminación Humana

Algunos residuos dentro de la industria son nocivos para la salud, tal es el caso de aquellos que contienen sulfuro, potenciales formadores de gas sulfhídrico que pueden provocar desmayos y accidentes fatales durante la limpieza de canaletas y tanques recolectores de efluentes. Los gases o vapores de solventes de la etapa de acabado son también peligrosos para la salud si son inhalados por largos periodos de tiempo.

3.6. Regulaciones Ambientales de Aguas Residuales de Tenería en Nicaragua

El Decreto No 21-2017, del 28 de noviembre de 2017, “Disposiciones para el control de la contaminación proveniente de las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y agropecuarios”, en su arto. 47 fija los valores máximos permisibles de los vertidos líquidos generados por la industria de curtidos y acabados de pieles que se descargan en las redes de alcantarillado y cuerpos receptores. En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros.

Tabla 3.2 Artículo 47, Decreto Ejecutivo No. 21-2017. Rangos y límites permisibles de aguas residuales provenientes de la industria de curtidos en Nicaragua.

Parámetros	Rangos y límites máximos permisibles Promedio Diario (mg/L)
pH	6 - 9
Sólidos Suspendidos Totales	180
Sólidos Sedimentables	5.0
DBO5	200
DQO	400
Sulfuros	0.2
Fenoles	0.5
Cromo total (mg/L)	0.5
Cromo hexavalente (mg/L)	0.1

Fuente: Gaceta, Diario Oficial. No. 229 del 30 de Noviembre de 2017.

3.7. Cromo

3.7.1. Generalidades y Características del Cromo

El metal cromo (Cr) es un sólido gris acero con un alto punto de fusión y un peso atómico de 51.996 g/mol. El cromo tiene estados de oxidación que van del cromo (-II) al cromo (+VI). El cromo forma una gran cantidad de compuestos, tanto en las formas de cromo (III) como de cromo (VI). Los compuestos de cromo son estables en el estado trivalente, siendo la forma hexavalente el segundo estado más estable. Los compuestos de cromo (III) son escasamente solubles en agua y pueden encontrarse en cuerpos de agua como complejos solubles de cromo (III), mientras que los compuestos de cromo (VI) son fácilmente solubles en agua (EPA, 2016).

El cromo metálico se utiliza principalmente para fabricar acero y otras aleaciones. Los compuestos de cromo, ya sea en forma de cromo (III) o cromo (VI), se utilizan para el cromado, la fabricación de tintes y pigmentos, la conservación de cuero y madera, y el tratamiento de torres de enfriamiento de agua. Cantidades más pequeñas se usan en lodos de perforación, textiles y tóner para máquinas copadoras.

3.7.2. Fuentes y exposición potencial

El cromo es un elemento natural en rocas, animales, plantas, tierra,

polvo y gases volcánicos. Las fuentes industriales más importantes de cromo en la atmósfera son las relacionadas con la producción de ferrocromo, refinación de minerales, procesamiento químico y refractario, plantas productoras de cemento, frenos de automóviles, los revestimientos y los convertidores catalíticos para automóviles; curtiembres de cuero y pigmentos de cromo también contribuyen a la carga atmosférica de cromo (HHS, 2012).

El cromo ocurre en el ambiente predominantemente en uno de dos estados de valencia: cromo trivalente (Cr III), que se produce naturalmente y es un nutriente esencial, y el cromo hexavalente (Cr VI), que, junto con el cromo metálico menos común (Cr 0), se produce más comúnmente por procesos industriales. El cromo (III) es esencial para el metabolismo normal de glucosa, proteínas y grasas y, por lo tanto, es una dieta esencial elemento. El cuerpo tiene varios sistemas para reducir el cromo (VI) a cromo (III).

Las emisiones al aire de cromo son predominantemente de cromo trivalente, y en forma de partículas pequeñas o aerosoles. La población general está expuesta al cromo (generalmente cromo [III]) al comer alimentos, beber agua, e inhalar aire que contiene el químico. Se estima la ingesta diaria promedio de aire, agua y alimentos, ser inferior a 0.2 a 0.4 microgramos (μg), 2.0 μg y 60 μg , respectivamente. La exposición cutánea al cromo puede ocurrir durante el uso de productos de consumo que contienen cromo, tales como madera tratada con dicromato de cobre o cuero curtido con sulfato crómico.

La exposición ocupacional al cromo se produce por la producción de cromato, la producción de acero inoxidable, el cromo enchapado y trabajos en industrias de curtido; la exposición ocupacional puede ser dos órdenes de magnitud más alta que la exposición a la población general. Las personas que viven cerca de sitios de eliminación de desechos de cromo o de las plantas de fabricación y procesamiento tienen una mayor probabilidad de exposición elevada al cromo que la población general. Estas exposiciones son generalmente a cromo mixto (VI) y cromo (III).

3.7.3. Toxicidad del Cromo

El cromo (VI) es mucho más tóxico que el cromo (III), tanto para exposiciones agudas como crónicas. El tracto respiratorio es el principal órgano objetivo para ser atacado por el cromo (VI), después de la exposición por inhalación en humanos se informó falta de aliento, tos y sibilancias en los casos en que un individuo inhaló concentraciones muy altas de trióxido de cromo. Otros efectos observados por la exposición aguda por inhalación a concentraciones muy altas de cromo (VI) incluyen

efectos gastrointestinales y neurológicos, mientras que la exposición dérmica provoca quemaduras en la piel (EPA, 1999).

La ingestión de altas cantidades de cromo (VI) causa efectos gastrointestinales en humanos y animales, incluyendo dolor abdominal, vómitos y hemorragia. Las pruebas en animales agudos han demostrado que el cromo (VI) tiene una toxicidad extrema por inhalación y oral exposición (EPA, 1999).

3.7.3.1. Cromo III

El cromo (III) es un elemento esencial en humanos, con una ingesta diaria de 50 a 200 μg / día recomendado para adultos. Las pruebas en animales han demostrado que el cromo (III) tiene una toxicidad moderada por exposición oral.

3.7.3.2. Cromo VI

La exposición por inhalación crónica al cromo (VI) en humanos produce efectos en el tracto respiratorio, con perforaciones y ulceraciones del tabique, bronquitis, disminución de la función pulmonar, neumonía, asma y picazón nasal y dolor. La exposición humana crónica a altos niveles de cromo (VI) por inhalación o exposición oral puede producir efectos sobre el hígado, los riñones, el sistema gastrointestinal e inmune, y posiblemente la sangre.

La EPA tiene poca confianza en la RfD basada en: baja confianza en el estudio en el que la RfD para el cromo (VI) porque se probó un pequeño número de animales, se midieron los parámetros de un pequeño número y no se observaron efectos tóxicos con la dosis más alta probada; y baja confianza en la base de datos porque los estudios de apoyo son igualmente de baja calidad y los puntos finales del desarrollo no están bien estudiados.

3.7.4. Forma de Ocurrencia: Especies Acuósas de Cromo

En la Tabla 3.3 se aprecia que el HCrO_4^{-1} y el CrO_4^{2-} son las especies predominantes a las concentraciones usuales de cromo de desechos.

En la Figura 3.1, se pueden observar las diferentes formas químicas y estados de oxidación del cromo para los diferentes rangos de pH y potencial Redox (Eh); apreciándose que el Cr (III) es el más estable de los estados de oxidación.

La concentración, presión, temperatura y la presencia de otros iones acuósos pueden tener influencia en las especies de cromo existentes.

Tabla 3.3. Principales reacciones en equilibrio del Cr (VI) (González y Gutiérrez, 2014).

Reacción	pKa (25°C)
$H_2CrO_4 \leftrightarrow H^+ + HCrO_4^{-1}$	0.8
$HCrO_4^{-1} \leftrightarrow H^+ + CrO_4^{-2}$	6.5
$2HCrO_4^{-1} \leftrightarrow Cr_2O_7^{-2} + H_2O$	1.5
$HCr_2O_7^{-1} \leftrightarrow Cr_2O_7^{-2} + H_2O$	1.8

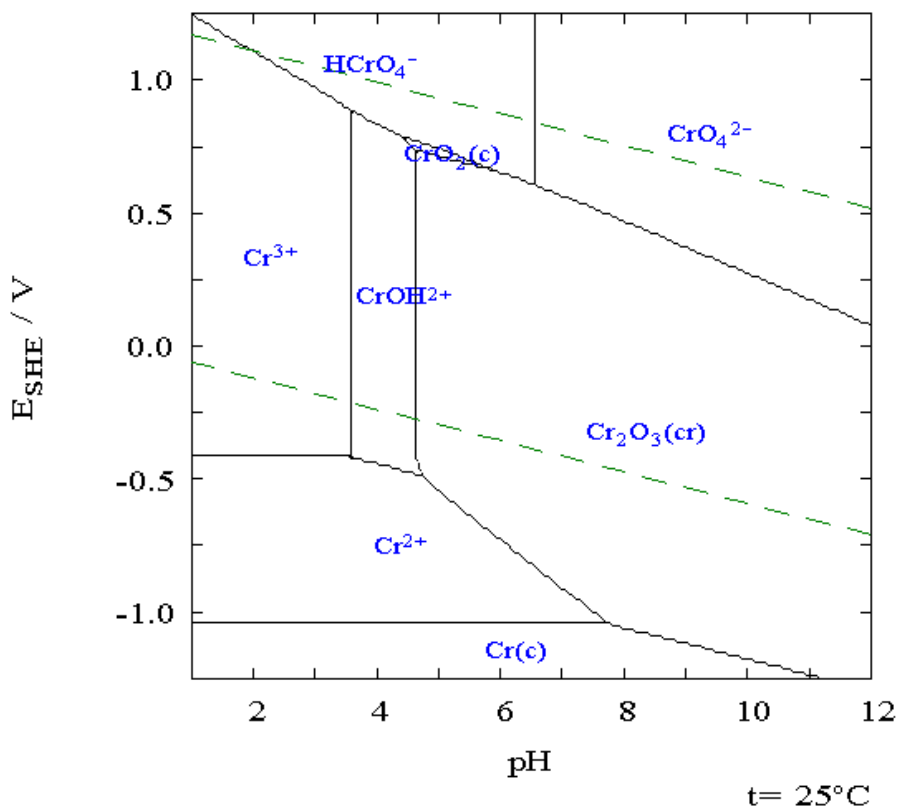


Figura 3.1. Diagrama Eh-pH para especies inorgánicas de cromo (González y Gutiérrez, 2014).

A pH ácido, las especies predominantes del cromo son $Cr_2O_7^{-2}$, $HCrO_4^{-1}$, H_2CrO_4 , $Cr_3O_{10}^{-2}$ y $Cr_4O_{13}^{-2}$ y el Cr (VI) se encuentra en su forma aniónica predominante (anión $HCrO_4^{-1}$) (Rao y Shashikant, 1992).

En los medios acuáticos, el Cr (VI) se encuentra principalmente en forma soluble, que puede ser lo suficientemente estable como para ser transportada en el medio.

Sin embargo, el Cr (VI) finalmente se convierte en Cr (III) mediante la reducción de especies tales como las sustancias orgánicas, el ácido sulfhídrico, el azufre, el sulfuro de hierro, el amonio y el nitrito (USPHS, 1997; Kimbrough *et al.*, 1999). Por lo general, el Cr (III) no migra de manera significativa en los sistemas naturales, sino que se precipita rápidamente y se adsorbe en partículas en suspensión y sedimentos del fondo.

Los cambios en las propiedades físicas y químicas del medio acuático pueden alterar el equilibrio entre el Cr (III) y el Cr (VI) (Richard y Bourg, 1991). Se ha comprobado que el Cr (III) y el Cr (VI) se acumulan en muchas especies acuáticas, especialmente en peces que se alimentan del fondo, como el bagre (*Ictalurus nebulosus*), y en los bivalvos, como la ostra (*Crassostrea virginica*), el mejillón azul (*Mytilus edulis*) y la almeja de caparazón blando (*Mya arenaria*) (Kimbrough *et al.*, 1999).

3.8. Adsorción

La adsorción es el proceso mediante el cual líquidos, gases, materia suspendida, coloides, moléculas, átomos o iones disueltos son atraídos hacia la superficie de un material adsorbente mediante fuerzas intermoleculares de atracción, generalmente esto conlleva a la formación de enlaces donde se libera energía en forma de calor (Figura 3.2) (García Granados, 2015). La adsorción se puede llevar a cabo en interfase Líquido-Gas, Sólido-Gas y Líquido – Sólido (Hines y Maddox, 1984).

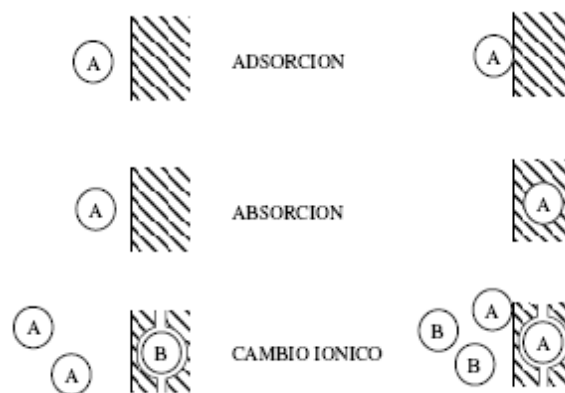


Figura 3.2 Diferentes procesos de sorción. (Appelo y Postma, 1993).

En los procesos de adsorción, al soluto retenido se le denomina adsorbato y el sólido sobre el que se retiene es el adsorbente o simplemente sorbente. Como adsorbentes se utilizan sólidos que presentan una gran superficie de contacto, y por lo general son porosos (Figura 3.3).

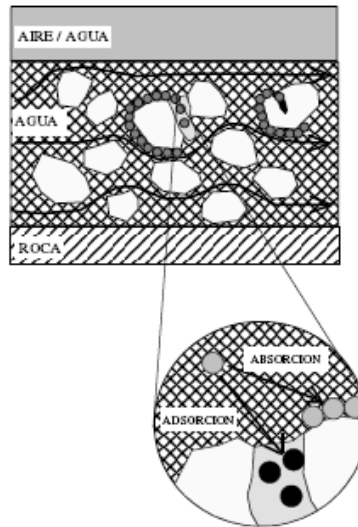


Figura 3.3 Representación Esquemática de los procesos de adsorción. (Appelo y Postma, 1993).

Uno de los más utilizados es el carbón activo, aunque existen polímeros sintéticos que también se utilizan en adsorción y son los denominados tamices moleculares (Ibarz, 2005).

3.8.1. Tipos de Adsorción

Dependiendo de qué tipos de fuerzas existan entre el soluto y el adsorbente, se pueden diferenciar tres tipos de adsorción (González, 2010):

3.8.1.1. Adsorción por Intercambio

En este proceso el soluto y el adsorbente se atraen por fuerzas electrostáticas. Los iones del soluto se concentran en la superficie del sorbente, que se halla cargada eléctricamente con signo contrario a los iones del soluto.

Si tenemos dos adsorbatos iónicos iguales en varios factores, pero uno con mayor carga que otro, el de mayor carga será adsorbido. Para adsorbatos con igual carga, el tamaño molecular es el que determina cuál será adsorbido.

3.8.1.2. Adsorción por Fuerzas de Van Der Waals

También llamada adsorción física o fisorción. En este tipo de adsorción, el adsorbato no está fijo en la superficie del adsorbente, sino que tiene movilidad en la interfase. Ejemplo de este tipo de adsorción es el de la mayoría de las sustancias

orgánicas en agua con carbón activado. En este tipo, el adsorbato conserva su naturaleza química.

3.8.1.3. Adsorción Química

La adsorción de una especie química presente en la solución (adsorbato) por los constituyentes de la fase sólida del adsorbente ocurre debido a las interacciones entre la superficie activa de las partículas sólidas y el adsorbato. La cantidad adsorbida de una determinada especie depende no solo de la composición sino también de la especie química de la que se trata y de su concentración en la solución.

3.8.2. Parámetros que Influyen en el Proceso de Adsorción

El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la adsorción de cationes como de aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la adsorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4,5, la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH, entre 1,5 y 4 (Kuyucak y Volesky, 2008; citado en Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012).

3.8.2.1. Tiempo de Equilibrio en la Adsorción

Generalmente, la adsorción del metal pesado ha sido evaluada mediante la utilización de isothermas que describen el equilibrio del proceso. Los modelos de Langmuir y Freundlich han sido posiblemente los más utilizados para describir con éxito el equilibrio de adsorción; aunque ambos modelos son empíricos, las constantes del modelo de Langmuir son más fácilmente interpretables.

Para la adsorción de metales pesados, la retención aumenta inicialmente de una manera lineal con la concentración en el equilibrio; esta retención está limitada por el número de sitios activos y, por tanto, llega a alcanzarse una meseta, que no es más que aquel tiempo a partir del cual el adsorbente, por más que se mantenga en contacto con la solución, ya no produce más adsorción (*Volesky B. 1990 citado en Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012*).

3.8.2.2. Masa de Adsorbente en la Adsorción

La cantidad de adsorbente es el factor que va a limitar hasta cierto punto la concentración de metal que se adsorbe, es decir a mayor cantidad de adsorbente, se obtiene una mayor adsorción, pero lo ideal es llegar a una relación de equilibrio, entre la cantidad de adsorbente y la concentración de metal, para un óptimo resultado de adsorción (Garces Jaraba y Coavas Romero, 2012).

3.9. Isotermas de Adsorción

La isoterma de adsorción es la relación de dependencia, a una temperatura constante de la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio (Álvarez, 2005).

Duarte y Rodríguez (1997) reporta que la adsorción es favorable, aun en soluciones diluidas, cuando cualquier isoterma de adsorción, es cóncava hacia las abscisas; de forma contraria, se dice que la adsorción es desfavorable cuando la isoterma es cóncava hacia el eje de las ordenadas.

Los modelos de adsorción clásicos como Langmuir y Freundlich son los más utilizados para describir el equilibrio entre los iones del metal adsorbidos en la biomasa (q_{eq}) y la concentración del metal remanente en la solución (C_{eq}) a una temperatura constante (Duarte, Olivero y Jaramillo, 2009).

Las isotermas se obtendrán relacionando la capacidad de adsorción del adsorbente (q_{eq}) y la concentración final del ión metálico en el equilibrio (C_{eq}). La capacidad de adsorción se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$q_e = \frac{(C_o - C_{eq})V}{m} \quad (1)$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción del adsorbente (mg/g), C_o es la concentración inicial del metal en la solución (mg/L), C_{eq} es la concentración final del metal en el equilibrio (mg/L), V es el volumen de las soluciones de ión metálico (L) y m es la masa del adsorbente utilizado en cada experimento (g).

Las isotermas son parte esencial para modelar la adsorción y por lo tanto para el diseño, cálculo de eficiencias y costos de la adsorción. Además, permiten estimar el grado de purificación que puede ser alcanzado, la cantidad de adsorbente requerido, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del producto (Tejada *et al.*, 2014).

3.9.1. Isotermas de Freundlich

Es una isoterma de adsorción, que consiste en una curva que relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto.

La ecuación de Freundlich considera que los sitios activos del adsorbente no son iguales y además, asume la adsorción multicapa; es decir, que una vez cubierta la

superficie del adsorbente, otras moléculas del adsorbato pueden ser acomodados sobre una segunda superficie.

La isoterma de Freundlich se describe por medio de una ecuación exponencial empírica de la forma (Gerente, Lee, Cloirec y MacKay, 2007):

$$q_e = a_F C_{eq}^{b_F} \quad (2)$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción de adsorbato por unidad de peso del adsorbente (mg soluto/g_{sólido}); C_{eq} es la concentración de equilibrio del adsorbato correspondiente a q_e ; (mg/L); a_F es una constante del sistema adsorbato – adsorbente y b_F es un parámetro empírico que usualmente tiene valores menores que la unidad.

La linealización de la ecuación Ec.2 se lleva a cabo en su forma logarítmica:

$$\log q_e = \log a_F + b_F \log C_{eq} \quad (3)$$

Los valores numéricos de a_F y b_F pueden ser encontrados del intercepto y la pendiente de la recta.

3.9.2. Isotermas de Langmuir

La isoterma de Langmuir (1918) es el primer modelo teórico más sencillo para la adsorción de gases en sólidos. Este modelo se basa en la suposición de que la superficie del adsorbente está cubierta con un gran número de sitios o posiciones, en cada una de las cuales pueden asentarse una molécula adsorbida (Levit, 1979). Así también, considera que las posiciones son todas equivalentes y que no hay interacción entre las moléculas adsorbidas.

Con los datos de la capacidad de adsorción q_e (mg/g), la capacidad máxima adsorbida por el adsorbente, $q_{e,max}$ (mg/g), la constante de ligamiento b (g/L) y la concentración final del metal en el equilibrio C_{eq} (mg/L), se obtiene el modelo de la isoterma de Langmuir mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_{e,max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad (4)$$

Siendo su forma linealizada:

$$\frac{C_{eq}}{q_e} = \frac{1}{q_{e,max}} C_{eq} + \frac{1}{q_{e,max} b} \quad (5)$$

Para obtener estas isothermas se grafican los datos de la concentración final del metal en el equilibrio (C_{eq})/la capacidad de adsorción de la semilla triturada de moringa (q_{eq}) en función de los datos de la concentración del metal en el equilibrio (C_{eq}).

Los valores numéricos de la capacidad máxima de adsorción del metal respecto al adsorbente, $q_{e,max}$ (mg/g) y la constante de ligamiento b (L/mg) son obtenidos de la pendiente y la intersección de la forma lineal de la isoterma de Langmuir.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se establecen los procedimientos, materiales y equipos que se utilizaron en el estudio de las características de la semilla triturada de *Moringa oleifera* (M.O.), la evaluación de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente utilizando aguas sintéticas de laboratorio y su aplicación en efluentes de una tenería ubicada en la Ciudad de León.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Ambiental, de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (FIQ-UNI).

4.1. Universo

El universo de estudio está enfocado en la aplicación de la semilla triturada de *Moringa oleifera* con bajo contenido de aceite para la remoción de cromo de muestras de aguas sintéticas a diferentes concentraciones de cromo hexavalente para las pruebas experimentales y aguas residuales de tenería.

4.2. Materiales

4.2.1. Semillas de *Moringa oleifera*

Las semillas fueron seleccionadas teniendo en cuenta, su fácil adquisición con especial atención a los cultivos más extendidos en el sector comercial nacional. Las semillas se recolectaron en el municipio de La Paz Centro del Departamento de León, con geo referencia: 12°19'27.44" N y 86°37'17.11" O, elevación de 70 msnm.

4.2.2. Reactivos y Equipos de Laboratorio

Los equipos y reactivos necesarios para los experimentos, así como los materiales y cristalería utilizados, se presentan en la Tabla A.1, A.2 y A.3 del Anexo A.1.

4.3. Determinación de las Propiedades de la *Moringa oleifera*

4.3.1. Preparación de las Semillas de *Moringa oleifera*

Para llevar a cabo la investigación fue necesario preparar la semilla de *Moringa oleifera* hasta obtener un tamaño de partícula adecuado para usarse como bioadsorbente. Para ello, se siguieron los siguientes pasos (Diagrama de flujos del proceso en el Anexo A.2):

- **Selección:** todas las semillas deben tener buena apariencia visual y con la madurez necesaria (testa de color café oscuro). Se seleccionaron aquellas semillas que cumplían con estas características.
- **Triturado:** con el objetivo de obtener partículas de menor tamaño, aumentar el área de contacto entre la *Moringa oleífera* y el agua a tratar, e incrementar los sitios activos para la adsorción de cromo, la semilla de *Moringa oleífera* se trituró en un molino de disco.
- **Secado:** la semilla triturada de *Moringa oleífera* se secó en un horno a 110°C por 2 horas y media, para reducir la humedad. Esta etapa se llevó a cabo en un horno donde circula aire caliente, hasta obtener una semilla con solo 12.5% de humedad.

El cálculo del porcentaje de humedad en la semilla se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$\%Humedad = 1 - \frac{A}{B} \times 100 \quad (6)$$

Donde A y B son el peso final después del calentamiento y el peso inicial de la muestra, respectivamente, en gramos.

- **Tamizado:** para obtener el rango de tamaño de partícula deseado, el material se depositó en una criba superior del juego de tamices, limpios y ordenados en forma decreciente hasta la criba ASTM 132 y ASTM 122. El rango de partícula para realizar pruebas posteriores es entre 0.322 mm y 0.22 mm.

Los tamaños de partícula se categorizaron en tres grupos, donde el tamaño de partícula grueso y fino corresponde a pérdidas del proceso.

Grupo	Tamaño de partícula
Grueso	>0.32 mm
Medio	0.32 mm > 0.22 mm
Fino	<0.22 mm

- **Pesaje:** La semilla triturada de *Moringa oleífera* de cada grupo obtenido se pesó y resguardó en frascos herméticos en el desecador para evitar la absorción de la humedad.

4.3.2. Determinación de la Densidad Aparente

En una balanza digital OHAUS Scout Pro modelo TI-204 se obtuvieron las masas de volúmenes iguales a 5, 15, y 25 mL de semilla triturada de *Moringa oleífera*. Para cada medición se calculó la densidad aparente mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_A = \frac{m_{mo}}{V_{mo}} \quad (7)$$

Donde m_{mo} es la masa seca de la *Moringa oleífera* en gramos, y V_{mo} es el volumen total de la *Moringa oleífera*, en mL.

4.3.3. Determinación de la Densidad Real

La densidad real o densidad de partícula se refiere al peso del material sólido que compone al adsorbente y constituye la masa de una unidad de volumen de partículas sólidas del material. Para obtener la densidad de partícula de la semilla triturada de *Moringa oleífera* se utilizó el método de picnómetros. Para ello, se emplearon dos picnómetros Duran 50 de 25 mL, calibrados según el procedimiento del laboratorio de Ambiental-UNI (Anexo A.4.1).

Inicialmente, el picnómetro se pesó vacío con la tapa puesta en la balanza digital. Seguidamente, el picnómetro se llenó con agua y se colocó la tapa de forma que escurriera el exceso de agua y se pesó el conjunto. Posteriormente, se eliminó aproximadamente la mitad del agua contenida en el picnómetro y se añadió la semilla triturada de *Moringa oleífera* previamente pesada. Inmediatamente se completó el volumen con agua hasta la medida indicada en el picnómetro, el cual se tapó y se pesó (m_T). Para el cálculo de la densidad real se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_R = \frac{m_{M.O}}{V_S} \quad (8)$$

Donde ρ_R es la densidad real en g/cm³, $m_{M.O}$ es la masa de la semilla triturada de *Moringa oleífera* en g, y V_S es el volumen del sólido en cm³. Este volumen se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_S = V_P - \frac{m_T - (m_P + m_{M.O})}{\rho_W} \quad (9)$$

Donde V_P es el volumen del picnómetro calculado en la calibración en cm³ (Anexo A.4.1), m_T es la masa del picnómetro con semilla triturada de *Moringa oleífera* y agua en g, m_P es la masa del picnómetro en g, $m_{M.O}$ es la masa de la semilla triturada de

Moringa oleífera en g y ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de trabajo en g/cm³.

4.3.4. Porosidad Total

Con los datos de la densidad aparente y la densidad real de la semilla triturada de *Moringa oleífera*, se calculó la porosidad mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{M.O} = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_R} \quad (10)$$

Donde ε_t es la porosidad total de semilla triturada de *Moringa oleífera*, ρ_A es la densidad de aparente de la *Moringa oleífera*, en g/mL y ρ_R es la densidad real o densidad de partícula de la *Moringa oleífera*, en g/mL.

4.3.5. Análisis espectral de la *Moringa oleífera*

Para identificar los grupos funcionales de la semilla de *Moringa oleífera* triturada y comprender su composición química se obtienen los espectros IR utilizando el Equipo FT-IR con accesorio ALPHA T. Estas características son muy importantes ya que están relacionadas con la capacidad de absorción de los iones metálicos del material adsorbente (Mondragón-Cortez, 2017; Zhang *et al.*, 2014).

La muestra seca de *Moringa oleífera* se trituró en un mortero de porcelana hasta lograr una consistencia de polvillo y se mezcló con bromuro de potasio (KBr) puro y seco, en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino. Una pequeña porción del polvo obtenido se colocó en un portador de muestra para preparar pastillas empleando para ello una prensa. Es importante evitar la contaminación de la muestra y seguir las indicaciones sobre el uso de la prensa para hacer la pastilla (García-González, 2018).

La pastilla, que debe ser homogénea y finísima, se colocó en una placa para muestras y se insertó en el Espectrofotómetro Alpha FTIR–Bruker. Seguidamente, se obtuvieron los espectros de la *Moringa oleífera* con y sin cromo hexavalente

4.4. Efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de Cr (VI)

Para estudiar el efecto del pH en el porcentaje de remoción de cromo VI en la semilla de *Moringa oleífera* se llevaron a cabo experimentos a diferentes valores iniciales de pH en intervalo de 4 a 7, de acuerdo al diseño experimental mostrado en la Tabla A.4 del Anexo A.3.

El pH inicial de la solución fue regulado por la adición de soluciones de ácido clorhídrico (HCl) de 0.01 y 1.0 N o hidróxido de sodio (NaOH) 0.3 – 3%, utilizando el pH-metro marca Orion, modelo 410 A. El procedimiento para la determinación de pH se presenta en el Anexo A.4.2.

Para las pruebas experimentales, una masa del bioadsorbentes (0.5 o 1.5 g) se puso en contacto con 40 mL de una solución de cromo VI de 50 mg/L, ajustada al pH inicial. Subsiguientemente, la mezcla se agitó en un agitador magnético marca Corning pc-420D a temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) durante una 1 hora y a una velocidad de agitación de 450 rpm. Finalmente, la mezcla se filtró y se determinó la concentración del cromo hexavalente por Espectrofotometría Ultravioleta-visible utilizando el método estándar para el análisis colorimétrico (3500-cr) con 1-5 Difenilcarbazida, detallado en la Norma Mexicana NMX-AA-044-SCFI (2014). El procedimiento y las condiciones de operación se muestran en el Anexo A.4.3.

El porcentaje de remoción de cromo VI por el adsorbente se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\%Remoción = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (11)$$

Donde C_i y C_f son la concentración inicial y la concentración final en la solución del cromo VI, en mg/L.

4.5. Determinación de las isotermas de Cromo VI en semillas de *Moringa oleífera*

Inicialmente se prepararon diferentes soluciones de 40 mL del ion cromo hexavalente, a distintas concentraciones, en un rango de 5 a 500 mg/L, de acuerdo al diseño experimental mostrado en la Tabla A.5 del Anexo A.3. Las soluciones fueron ajustadas al pH máximo de adsorción del bioadsorbente.

No obstante, debido a la alta adsorción mostrada por el material adsorbente y para determinar la máxima capacidad de adsorción de cromo hexavalente, se procedió a incrementar los experimentos de equilibrio de adsorción utilizando concentraciones iniciales del ion en la solución de 1000, 2500 y 5000 mg/L.

Cada solución fue introducida en un matraz Erlenmeyer de 150 mL y se le agregó la masa del bioadsorbente (0.5 y 1.5 g). Posteriormente, las muestras se agitaron a 250 rpm por 3 horas y, por último, las soluciones se filtraron para determinar la concentración del ion cromo hexavalente. Estos experimentos se realizaron por duplicado. Con los datos experimentales, se calculó la capacidad de adsorción (q_e) del ion Cr VI en el bioadsorbentes mediante la ecuación (1).

Para determinar el tipo de isoterma de adsorción, los datos experimentales fueron ajustados a los modelos linealizados de Freundlich (Ec.3) y de Langmuir (Ec.5).

4.6. Aplicación de los bioadsorbentes a aguas residuales de tenería

La aplicación de las semillas trituradas de *Moringa oleifera* se llevó a cabo utilizando aguas residuales de una Empresa de Tenería ubicada en la Ciudad de León. Para evitar la influencia de otros contaminantes presentes en el agua residual durante los experimentos de adsorción, se realizó un pretratamiento a las muestras siguiendo el procedimiento mostrado en el acápite A.4.4 del Anexo.

Posterior al pretratamiento, las muestras fueron diluidas en un factor de 1:5 con agua desionizada. Subsiguientemente, se realizaron los experimentos de adsorción de cromo hexavalente de las muestras con la *Moringa oleifera* usando dos diferentes masas: 0.5 g y 1.5 g de adsorbente.

El adsorbente se puso en contacto con 30 ml de muestra previamente diluida y ajustada a un pH inicial de 4 con hidróxido de sodio 1 M. Al final del proceso, las muestras se analizaron por Espectrofotometría Ultravioleta-visible, antes y después de aplicado el bioadsorbente, con el propósito de determinar el grado de remoción del cromo VI presente en las aguas residuales mediante la ecuación (11).

4.7. Diseño Experimental

4.7.1 Determinación del pH de máxima adsorción del Cr VI

4.7.1.1 Hipótesis

Hipótesis nula: El pH de la solución acuosa no tiene efecto en el porcentaje de la remoción de cromo utilizando semilla triturada de *Moringa oleifera*, en el rango de pH establecido en los experimentos.

Hipótesis alternativa: Al menos un valor de pH de la solución acuosa tiene efecto en el porcentaje de remoción del cromo, usando semilla de *Moringa oleifera*, en el rango de pH establecido en los experimentos.

4.7.1.2 Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado fue el diseño factorial 2^n , donde se consideraron los factores del pH de la solución y la masa del adsorbente como las variables independientes. Mientras, el porcentaje de remoción del cromo es la variable dependiente. El diseño factorial presenta la siguiente descripción:

Factores:	2	Réplicas:	1
Corridas base:	8	Total de corridas:	16
Bloques base:	1	Total de bloques:	1
Número de niveles: 4 y 2			

En la Tabla 4.1 se describen los parámetros considerados y en la Tabla A.4 del Anexo A.3 se presenta el cruce de variables de acuerdo al diseño experimental.

Tabla 4.1 Descripción de los parámetros establecidos para la determinación del pH de máxima adsorción.

Parámetro	Descripción	Unidades
pH	4, 5, 6 y 7	S/U
Masa del adsorbente	0.5 y 1.5	g
Concentración inicial de Cromo hexavalente	50	mg/L
Tiempo de agitación	1	h
Temperatura	25 ± 2	°C
Velocidad de agitación	450	rpm

4.7.2. Determinación de Isotermas del Cromo

4.7.2.1 Hipótesis

Hipótesis nula: La masa de adsorbente no influye en el ajuste de los datos en los modelos propuestos de las isotermas de adsorción de cromo VI en semilla triturada de Moringa oleífera, al pH de trabajo.

Hipótesis alternativa: La masa de adsorbente influye en el ajuste de los datos en los modelos propuestos de las isothermas de adsorción de cromo VI en semilla triturada de Moringa oleífera, al pH de trabajo.

4.7.2.2 Diseño Experimental

La determinación de las isothermas de adsorción se llevó a cabo al pH óptimo establecido en el acápite 4.4. Las variables a evaluar fueron la masa de adsorbente (0.5 y 1.5 g) y la concentración del metal Cr VI (en un rango de 5 a 500 ppm), manteniendo los siguientes parámetros constantes: temperatura (25 ± 2), tamaño de partícula (0,22 mm), tiempo de agitación (1 h), velocidad de agitación (450 rpm) y pH. El diseño factorial presenta la siguiente descripción:

Resumen del Diseño

Factores:	2	Réplicas:	1
Corridas base:	14	Total de corridas:	14
Bloques base:	1	Total de bloques:	1
Número de niveles: 7 y 2			

En la Tabla A.5 del Anexo A.3 se presenta el cruce de variables de acuerdo al diseño experimental. Estos experimentos se realizaron por duplicado. No obstante, debido a la alta adsorción que presentaba el material adsorbente, posteriormente se decidió incrementar la concentración inicial del ion en la solución a 1000, 2500 y 5000 mg/L.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los principales resultados y su discusión acerca de la determinación de la capacidad de adsorción de cromo VI de aguas sintéticas y aguas residuales de tenería, a un pH previamente definido. Este estudio incluye la caracterización de las principales propiedades de la semilla de *Moringa oleifera*.

5.1 Propiedades de la semilla de *Moringa oleifera*

5.1.1 Proceso de preparación de semilla de *Moringa oleifera*

Para este trabajo se utilizaron 1,035.5 gramos de semilla de *Moringa oleifera*, la cual fue suministrada por la Empresa Moringa Powr S. A., ubicado en Chichigalpa, Chinandega, Nicaragua.

La preparación de la semilla de *Moringa oleifera* involucró las siguientes etapas en el proceso: selección, triturado, secado y tamizado para obtener la semilla de *Moringa oleifera* triturada en el tamaño de partícula requerido para las pruebas experimentales. El diagrama de flujos del proceso se muestra en la Figura A.1 del Anexo A.2.

Durante la etapa de selección de la semilla, se obtuvo una pérdida de residuo del 9.6% de material en mal estado (semillas con moho) las cuales fueron desechadas. Por su parte, el proceso de molienda se llevó a cabo con un molino manual de disco. En esta etapa se tuvo un rendimiento del 95.7%, debido a pérdidas durante el proceso.

El secado consistió en el calentamiento de las semillas limpias molidas en un horno durante 1 hora y 15 minutos a 110°C. En esta etapa la semilla perdió humedad y se obtuvo un rendimiento del 91.64%. Por último, para el tamizado de la semilla, se seleccionó el tamaño de partícula entre 0.22 y 0.32 mm, obteniendo un bajo rendimiento, el cual fue 17.8 %. El rendimiento global del proceso fue del 14%. En la Tabla 5.1 se muestra los rendimientos obtenidos en cada etapa del proceso.

Tabla. 5.1 Balance de la materia prima en la preparación de la semilla de *M.O.*

Moringa con cáscara inicial	Rendimiento (%)	Obtenido (g)	Pérdida (g)
Selección	90.61	938.27	97.20
Molienda	95.70	897.55	40.70
Secado	91.64	822.48	75.10
Tamizado	17.80	146.15	676.30
Moringa procesada	14.00	146.15	889.35

5.1.2 Caracterización química de la semilla de *Moringa oleifera*

La caracterización de la semilla de *Moringa oleifera* involucró la determinación de los porcentajes de proteínas y grasas, los cuales se muestran en la Tabla 5.2. Estos resultados indican que las semillas de *Moringa oleifera* triturada contienen un alto porcentaje de proteínas y grasas. De acuerdo a sus estructura, estas moléculas orgánicas poseen grupos funcionales polares: hidroxilos (–OH), carboxilos (–COOH) y aminos (–NH₂), que funcionan como sitios activos para la retención de iones metálicos.

Tabla 5.2 Principales componentes de la semilla de *Moringa oleifera* triturada.

Componente	Concentración (% p/p)
Proteína (6.25)	28.05
Lípidos o Grasas	30.92

Según Ndabigengesere, Narasiah y Talbot (1995) los aminoácidos polares presentes en la semilla de *Moringa oleifera* son el ácido glutámico, el ácido aspártico, arginina, histidina y lisina, los cuales representan un agente coagulante activo de la semilla. Esta puede estar formada principalmente de una o varias proteínas o cadenas polipeptídicas solubles en agua permitiendo así mayor contacto con las partículas coloidales presentes en aguas turbias.

5.1.3 Determinación de la Densidad Aparente

La densidad aparente es una propiedad que está relacionada con la estructura del material y refleja el contenido total de la porosidad en el adsorbente, el grado de compactación y facilidad de circulación del agua y del aire. En la Tabla 5.3 se reflejan los resultados de la densidad aparente promedio determinada de la semilla de *Moringa oleifera* triturada.

Tabla 5.3 Densidad aparente de la semilla triturada de *Moringa oleifera*.

No.	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)
1	1.262	5	0.2524
2	4.667	15	0.3111
3	7.964	25	0.3186
Densidad aparente promedio (g/cm³)			0.2940

La densidad aparente promedio determinada de la *Moringa oleífera* triturada de 0.2940 mL/cm³, este resultado indica que este material es comparable a suelos orgánicos, con una alta porosidad y un alto grado de compactación. De acuerdo a Arteta (2007) a menor densidad aparente hay una mayor porosidad en el material, más compactación y menor permeabilidad al agua e intercambio de gases.

5.1.4 Determinación de la Densidad Real

Esta propiedad de la semilla triturada de *Moringa oleífera* se calculó considerando que la densidad del agua a 25°C tiene un valor de 0.9970. En la Tabla 5.4 se presentan los resultados del cálculo utilizando las ecuaciones (8) y (9).

Tabla 5.4 Densidad real de la semilla triturada de *Moringa oleífera*.

Masa del picnómetro vacío (g)	Masa de la semilla de <i>M.O</i> (g)	Masa Total (g)	Volumen del picnómetro (cm ³)	Volumen de la semilla de <i>M.O</i> (cm ³)	Densidad Real (g/cm ³)
19.745	5.00	45.256	25.0471	4.4744	1.1175
19.745	5.10	45.286	25.0471	4.5446	1.1222
19.785	4.98	45.198	24.9578	4.4633	1.1158
Densidad Real promedio de la semilla de <i>Moringa oleífera</i> (cm³)					1.1185

De acuerdo a Duckman y Brady (1993), aunque la densidad real tiene un interés relativo, nos permite determinar la porosidad total del material. El valor encontrado de la densidad real para la semilla triturada de *Moringa oleífera* es comparable con aquella para suelos orgánicos, los cuales pueden tener valores menores de hasta 1.50 g/cm³.

5.1.5 Porosidad total de la semilla de *Moringa oleífera*

En la Tabla 5.5 se presenta la porosidad total y el espacio poroso del lecho de biomasa. Esta se calculó a partir de la densidad aparente promedio (Tabla 5.3) y la densidad real o densidad de conjunto promedio (Tabla 5.4). El resultado de 73.7% de espacio poroso indica una alta capacidad de adsorción de la semilla de *Moringa oleífera* al haber mucha área de contacto.

Tabla 5.5 Densidad de conjunto, partícula y porosidad de la semilla de *M.O*.

Densidad Real (g/mL)	Densidad Aparente (g/mL)	Porosidad $\epsilon_{Moringa\ oleífera}$ (-)	Espacio Poroso (%)
1.1185	0.2940	0.7371	73.71

5.1.6 Caracterización por Análisis Espectral

Para la identificación de los grupos funcionales y la caracterización de los espectros IR de la semilla de *Moringa oleífera* se obtuvo el gráfico de absorbancia en función del número de onda (cm^{-1}) (Figura 5.1).

La Figura 5.1 muestra que el espectro IR de la semilla de *Moringa oleífera* exhibe una banda ancha de adsorción a 3400 cm^{-1} debido al estiramiento de los grupos hidroxilos (O–H) y por las vibraciones de tensión de las aminas y amidas primarias, grupos funcionales característicos de las proteínas, ácidos grasos, carbohidratos y unidades de lignina presentes en la semilla (Araújo, Melo, Alves y Coelho, 2010). Los picos de fuerte intensidad a 2925 y 2857 cm^{-1} se atribuyen al estiramiento asimétrico y simétrico, respectivamente, de los grupos CH_2 (enlace C–H), grupos que forman parte de las moléculas orgánicas. La banda de fuerte intensidad a 1665 cm^{-1} se deben a las vibraciones de flexión de la amida I (–NH–C=O–) del grupo acetilo y de las aminas primarias (–NH₂), una banda de intensidad media a 1580 cm^{-1} debido al enlace C–N de la aminas, grupos funcionales característicos de las proteínas.

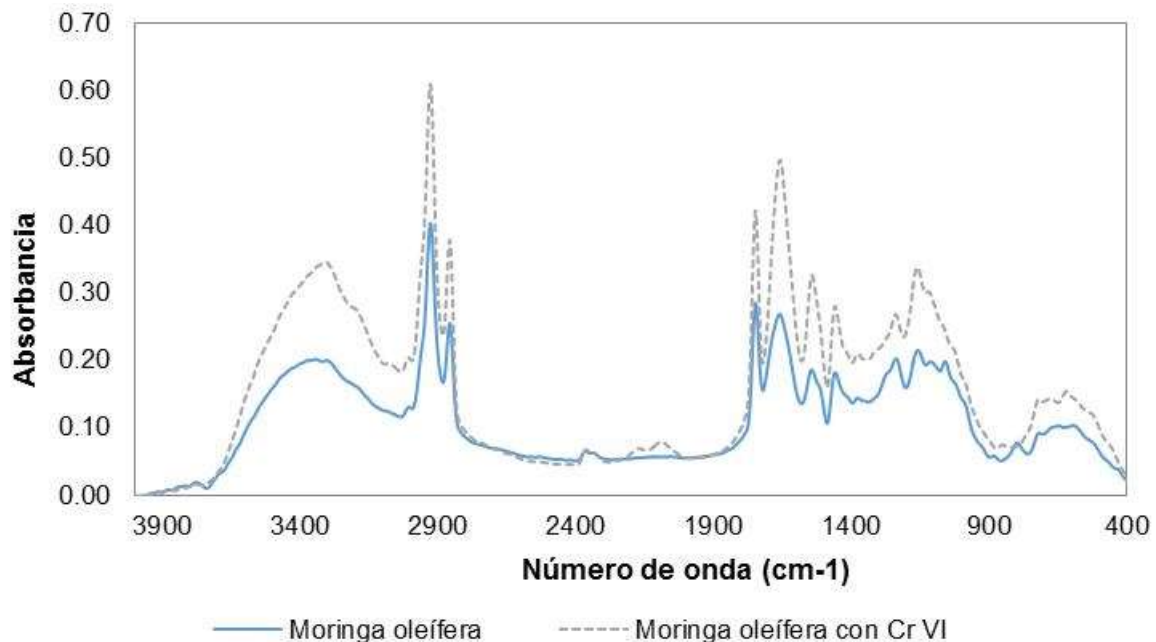


Figura 5.1 Comparación de los espectro IR de la semilla triturada de *Moringa oleífera* sin y con cromo hexavalente.

La comparación de los espectros IR de la semilla triturada de *Moringa oleífera* sin cromo VI (línea continua) y con cromo hexavalente (línea discontinua) mostrados en la Figura 5.1, refleja que ambos espectros presentan las mismas bandas de adsorción de los grupos funcionales característicos de la semilla triturada de *Moringa*

oleífera. No obstante, se observa que el espectro IR con cromo hexavalente muestra incremento en la intensidad de las bandas y desplazamientos de las principales bandas entre 1665 y 1100 cm^{-1} , que corresponden a los grupos aminos y al enlace Cr=O de los grupos carboxílicos, respectivamente (Trivedi *et al.*, 2015)

Estos cambios pueden ser producto de la formación del complejo entre los grupos funcionales polares (-OH, -COOH y -NH₂) presentes en la semilla de *M.O* y el Cr VI. Esta observación concuerda con lo reportado por Álvarez y Blanco (2019), los cuales apreciaron un incremento en la intensidad de las bandas principales de la cascarilla de arroz debido a la adsorción de aluminio. Así también, Romero y Sánchez (2018) notaron un cambio de intensidad en la banda de absorción de 2000 – 2400 cm^{-1} , atribuible a la interacción entre el quitosano modificado con Cu²⁺ y el cromo hexavalente.

5.2 Influencia del pH en la adsorción de cromo VI

Los resultados obtenidos experimentalmente mediante la determinación del pH óptimo de adsorción del cromo hexavalente usando semilla de *Moringa oleífera* en un intervalo de pH de 4 a 7, se muestran en Figura 5.2.

Los parámetros establecidos fueron: concentración inicial de cromo hexavalente de 50 mg/L, el tiempo de contacto se estableció en 1h, velocidad de agitación de 450 rpm a una temperatura de 25±1°C y con masas de adsorbente de 0.5 y 1.5 g.

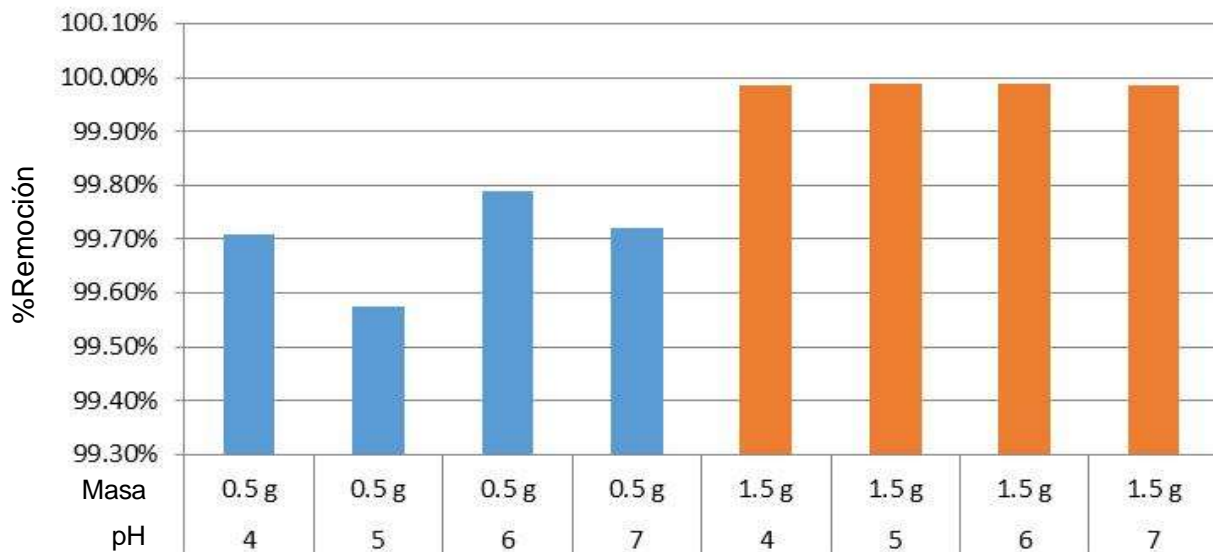


Figura 5.2 Porcentaje de remoción de cromo hexavalente a diferentes masas de bioadsorbente en un rango de pH de 4 a 7.

Los resultados muestran que el pH tiene poco efecto en la remoción de cromo hexavalente, independientemente de la masa de bioadsorbente empleada en los experimentos. De acuerdo a los datos experimentales, el menor porcentaje de remoción obtenido fue de 99.58% para pH de 5 y masa de 0.5 g de adsorbente.

Al incrementar la masa del adsorbente a 1.5 g se obtuvieron porcentajes de remoción mayores al 99.8%, independiente del pH inicial en el intervalo de pH estudiado. Estos resultados permiten aseverar que la semilla de *Moringa oleifera* se puede aplicar a diferentes tipos de aguas residuales que contengan cromo hexavalente sin aumentar el costo adicional debido al ajuste de pH de las aguas.

Estos resultados difieren de aquellos obtenidos en el estudio de remoción de cromo VI usando quitosano modificado con cobre y zinc (Romero y Sánchez, 2018). En este trabajo, los mayores porcentajes de remoción fueron de 98% usando quitosano modificado con cobre y 97.6% quitosano modificado con zinc a un pH inicial de 3, observándose que el porcentaje de remoción disminuía al aumentar el pH de la solución acuosa, lo cual indica que la capacidad de remoción de estos bioadsorbente son totalmente dependiente del pH.

En otro estudio realizado por González y Gutiérrez (2014), ellos obtuvieron bajos porcentajes de remoción de Cromo VI (34.0%) usando bentonita termo activada en comparación con los resultados alcanzados con el uso de la semilla de *Moringa oleifera*. En este caso también se observó mayores porcentajes de remoción a bajos valores de pH. Así también, estudios efectuados para la adsorción de cromo VI en cáscara de naranja, los autores reportaron que al disminuir el pH de la solución de cromo VI aumenta la adsorción de este metal, obteniendo una capacidad máxima adsorción de 8,068 mg/g a pH 3 y una temperatura de 30°C (Ektepe et al (2010), citado en Tejada (2015)).

Así también, otros estudios han demostrado que el pH de la solución tiene efecto en la capacidad de adsorción del cromo VI en el adsorbente y está condicionada por las características del bioadsorbente y de los sitios activos presentes en el material que permiten la adsorción. En la Tabla 5.6 se presentan algunos bioadsorbentes usados para la remoción del cromo hexavalente al pH de máxima adsorción, observándose que el pH de máxima adsorción varía de acuerdo al adsorbente utilizado.

Tabla 5.6 pH de adsorción de algunos adsorbentes provenientes de desechos agrícolas usados para la remoción de cromo hexavalente.

Adsorbente	pH	Porcentaje de remoción (%)	Sistema de adsorción	Tipo de agua	Referencia
Cascarilla de avellana	1.0	99.4	Batch	Sintética	Cimino et al. 2000
Aserrín	2.0	53.5	Batch	Sintética	Dakiky et al. 2002
Torta de aceituna	2.0	47.2	Batch	Sintética	Dakiky et al. 2002
Cascarilla de nuez	3.5	85.3	Batch	Sintética	Pehlivan and Altun 2008

Fuente: Owlad, Aroua, Daud y Baroutian (2008).

5.3. Determinación de las Isotermas de adsorción de cromo VI

Los datos experimentales del equilibrio de adsorción del cromo hexavalente en semilla triturada de *Moringa oleífera*, con masas de adsorbente de 0.5 y 1.5 g fueron evaluados usando los modelos linealizados de la isoterma de adsorción de Freundlich (Ec.3) y Langmuir (Ec.5). Los datos experimentales se presentan en la Tabla A.6 del Anexo A.3.3, y en la Figura 5.3 se muestran los resultados de manera gráfica.

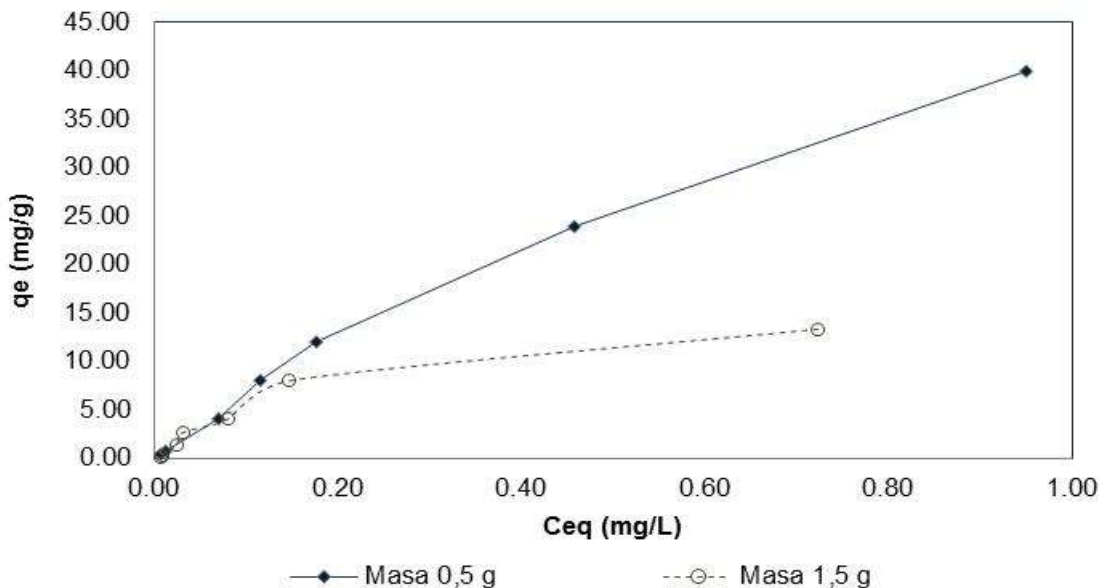
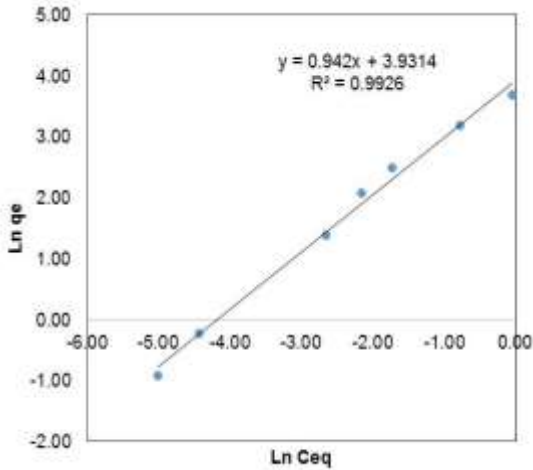
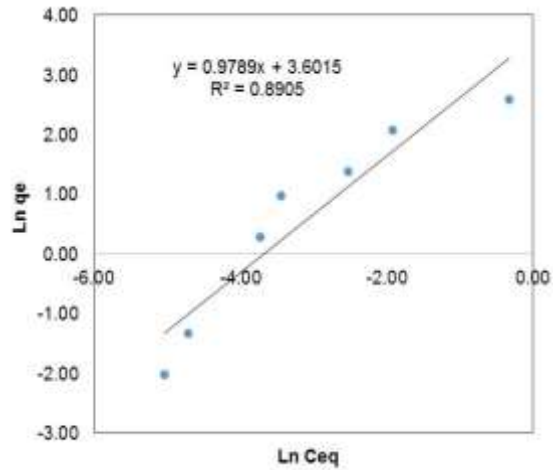


Figura 5.3 Isotermas de adsorción de cromo VI usando diferentes masas de semilla de *Moringa oleífera* como adsorbente en un intervalo de concentración inicial de 5 a 500 mg/L.

En la Figura 5.4 se presentan los gráficos de $\ln q_e$ en función del $\ln C_{eq}$ para el modelo linealizado de Freundlich, y los valores de la adsorción específica C_{eq}/q_e en función de la concentración en equilibrio C_{eq} para el modelo linealizado de Langmuir, correspondientes a los datos experimentales de la adsorción de cromo VI, a diferente masa del bioadsorbente.

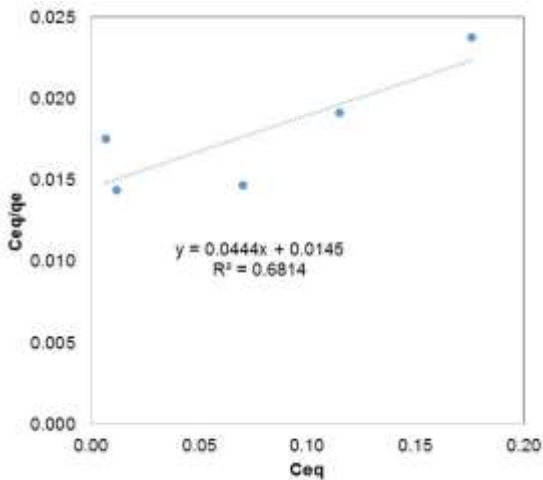


(a) 0.5 g de adsorbente

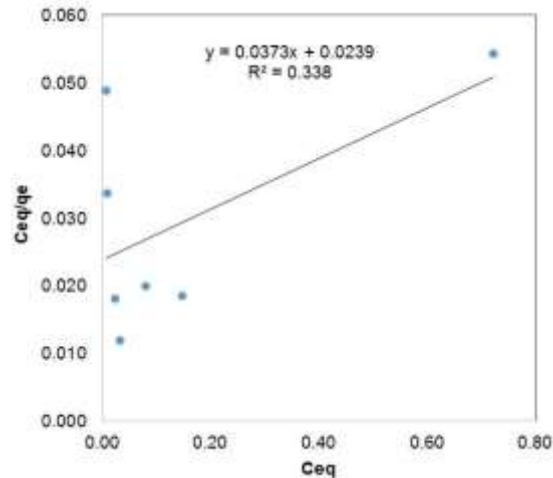


(b) 1.5 g de adsorbente

Modelo linealizado de la isoterma de Freundlich



(a) 0.5 g de adsorbente



(b) 1.5 g de adsorbente

Modelo linealizado de la isoterma de Langmuir

Figura 5.4 Isotermas de adsorción de cromo VI en semilla triturada de Moringa oleífera aplicando los modelos linealizados de Freundlich y Langmuir.

Como se observa en los gráficos de la Figura 4, el ajuste lineal de las isothermas de Freundlich y Langmuir, mostró que el coeficiente de correlación (R^2) fue mayor, en todos los casos, para el modelo de Freundlich (mayor que 0.89). Esto indica que, bajo estas condiciones de trabajo, este modelo es el que mejor describe los datos experimentales de la adsorción del cromo VI usando moringa oleífera como adsorbente.

Así también, el bajo ajuste de los datos experimentales al modelo de Langmuir (R^2 menor que 0.6) demuestra que si hay interacción entre las moléculas adsorbidas. Este resultado implica que la adsorción de cromo VI en la moringa oleífera, se puede producir en multicapas. Es decir, las moléculas de cromo hexavalente se depositan en la superficie de la semilla de *Moringa oleífera*, en posición de una sobre otra, después que se ha completado la monocapa en los sitios activos del adsorbente. Esta adsorción ocurre en superficies heterogéneas, con energías variables en la superficie de adsorción (van Loon y Duffy, 2005).

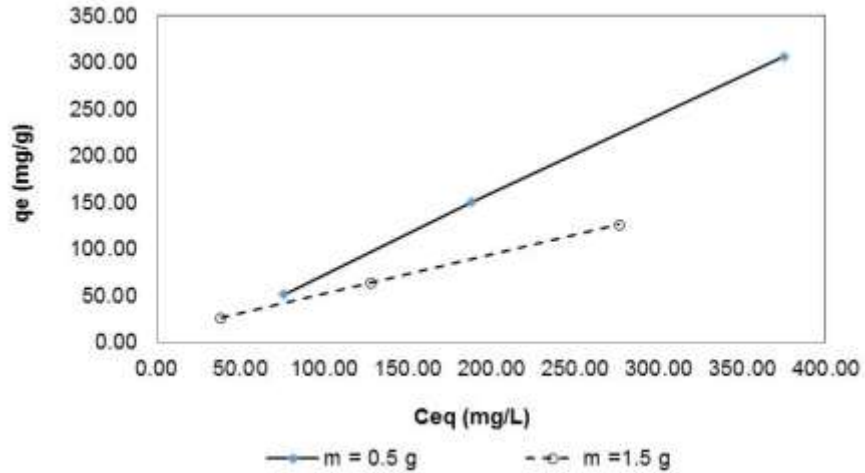
En la Tabla 5.7 se muestran los parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo hexavalente a diferente masa de adsorbente, calculados a partir de la ecuación de la recta de regresión lineal presentados en los gráficos de la Figura 5.4.

Tabla 5.7 Parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo hexavalente a diferente masa de adsorbente.

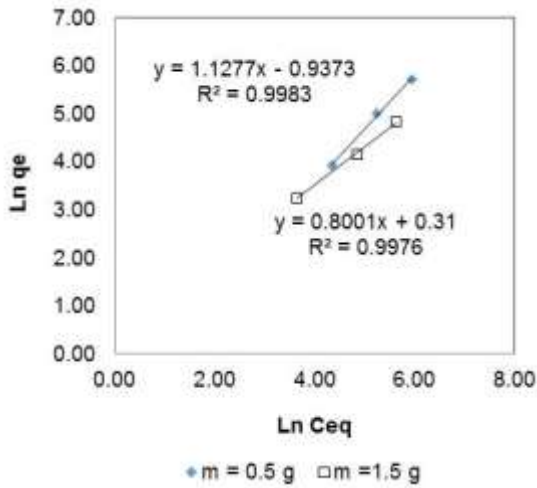
Masa (g)	Isoterma de Langmuir	Isoterma de Freundlich		
	R^2	R^2	α_F ($\text{mg}^{1-b_F} \cdot \text{L}^{b_F}/\text{g}$)	b_F (-)
0.5	0.68	0.99	50.97	0.942
1.5	0.34	0.89	36.65	0.979

Debido a los altos porcentajes de remoción de cromo hexavalente (mayores que 99%) mostrada por el material adsorbente, se procedió a extender los experimentos de equilibrio de adsorción utilizando concentraciones iniciales del ion en la solución de 1000, 2500 y 5000 mg/L, para determinar la máxima capacidad de adsorción de cromo hexavalente.

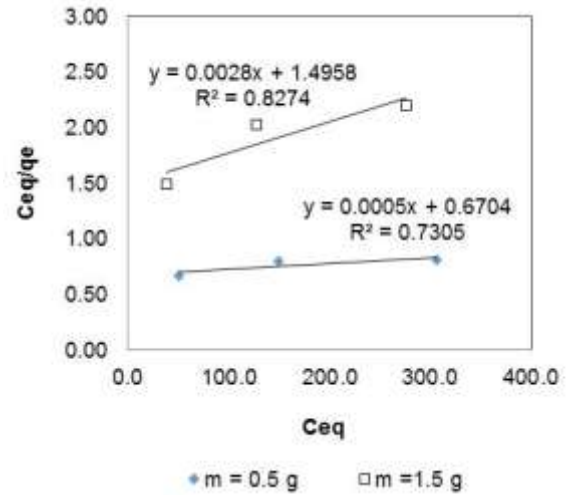
Los datos experimentales de estas pruebas se muestran en la Tabla A.7 del Anexo A.3.3. Mientras en las Figura 5.5 se expresan de manera gráfica las isothermas de la adsorción de cromo hexavalente ajustadas al modelo de Freundlich y al modelo de Langmuir.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5 (a) Isotermas de adsorción de cromo VI usando diferentes masas de adsorbente en un intervalo de concentración inicial de 1000 a 5000 mg/L, (b) datos ajustados al modelo linealizado de Freundlich y (c) datos ajustados al modelo linealizado de Langmuir.

La Tabla 5.8 presenta los parámetros de las isotermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo hexavalente en un intervalo de concentración inicial del cromo VI de 2000 a 5000 mg/L. Estos parámetros fueron calculados a partir de la ecuación de la recta de regresión lineal presentados en los gráficos de la Figura 5.5.

Tabla 5.8 Parámetros de las isotermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo hexavalente a diferente masa de adsorbente en un intervalo de concentración inicial de 1000 a 5000 mg/L.

Masa (g)	Isotherma de Langmuir			Isotherma de Freundlich		
	R ²	q _{e,max} (mg/g)	b (L/mg)	R ²	α _F (mg ^{1-b_F} ·L ^{b_F} /g)	b _F
0.5	0.73	2000.0	7.46E-4	0.99	0.392	1.128
1.5	0.83	357.0	1.87E-3	0.99	1.363	0.800

Los resultados muestran que con una masa de 0.5 g de bioadsorbente es suficiente para obtener una alta capacidad máxima de adsorción, en el rango de trabajo establecido. Esto puede deberse a que, según los datos experimentales mostrados en la Tabla A.7 del Anexo A.3.3, independientemente de la masa de adsorbente utilizada, los porcentajes de remoción eran similares (entre el 93.8% y 96.25%).

Los datos de la capacidad máxima de adsorción, q_{e,max}, de cromo VI en semilla de *Moringa oleífera* muestran altos valores en comparación con aquellos obtenidos por Romero y Sánchez (2018) en el estudio de remoción de cromo VI usando quitosano modificado con cobre y zinc, los cuales fueron de 11.35 mg/g y 19.6 mg/g, respectivamente.

5.4. Adsorción de cromo hexavalente de aguas residuales de tenería

Para este estudio, las muestras de agua residual fueron proporcionadas por una industria de tenería ubicada la ciudad La Paz Centro, León. Las muestras fueron extraídas de piletas de depósitos del agua a la salida del proceso del curtido, con un pH de 2.10.

El análisis por Espectrofotometría Ultravioleta-visible de la concentración inicial de cromo hexavalente en el agua residual mostró un contenido de 0.158 mg/L; observándose que este valor está por encima del límite permisible de las normas ambientales en Nicaragua, según el artículo 47 del Decreto Ejecutivo N°. 21-2017, Aprobado el 28 de Noviembre de 2017 para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de curtido y acabado de pieles.

La Tabla 5.9 muestra los resultados del porcentaje de remoción alcanzados después del proceso de adsorción de cromo hexavalente usando dos diferentes masas de semilla de *Moringa oleífera* de 0.5 g y 1.5 g.

Tabla 5.9 Resultados del proceso de adsorción de cromo hexavalente usando aguas residuales de tenería a diferentes masas de adsorbente.

Masa (g)	Concentración inicial de Cr VI (mg/L)	Concentración final de Cr VI (mg/L)	Porcentaje de Remoción (%)
0.5	0.158	0.0145	90.8
1.5	0.158	0.0088	94.4

Los resultados mostraron que usando una masa de adsorbente de 1.5 g se obtuvo un mayor porcentaje de remoción con un 94.4%. No obstante, estos datos también indican que el porcentaje de remoción del cromo hexavalente fue menor en las muestras de aguas residuales de tenería que en las soluciones sintéticas; ya que en las soluciones sintéticas, con bajas concentraciones iniciales, se alcanzaron porcentajes de remoción mayores que 99%. Esto puede deberse a la presencia de otros iones metálicos en las aguas residuales que compiten con los iones de cromo hexavalente por los sitios de adsorción.

En comparación con los resultados obtenidos por Bello et al. (2015), donde se probaron diferentes materiales como; las cascarilla de arroz con 95.2%, hoja de té negro con 99.9% y cascarilla de nueces con 80% de remoción, se comprueba que la semilla de *Moringa oleífera* alcanzó similares porcentajes de remoción.

6. CONCLUSIONES

La caracterización de la semilla de *Moringa oleífera* indica que tiene dos componentes principales: proteínas en un 28.05% y lípidos insaturados en un 30.92%, lo cual favorece la adsorción de metales pesados por la presencia de sitios activos tales como grupos hidroxilos ($-\text{OH}$), carboxilos ($-\text{COOH}$) y aminos ($-\text{NH}_2$).

La evaluación del efecto del pH y la masa de adsorbente mostró que el pH no tiene efecto en la remoción del cromo hexavalente en el intervalo de pH de 4 a 7, y que independiente de la masa de adsorbente utilizada, los porcentajes de remoción son similares, obteniéndose valores mayores al 99%.

El modelo Freundlich presentó un mejor ajuste que el modelo de Langmuir indicando que el proceso de adsorción de cromo hexavalente en la semilla de *Moringa oleífera* es un tipo de adsorción Multicapa, mostrando una consistencia de una distribución exponencial de centros activos característicos de una superficie heterogénea.

La capacidad máxima de absorción de cromo hexavalente fue de 2000 mg/g a una concentración inicial de 5000 mg/L y 0.5 g de bioabsorbente, comprobando que la semilla de *Moringa oleífera* es un absorbente muy eficaz para la adsorción de cromo hexavalente.

La aplicación de la semilla de *Moringa oleífera* en aguas residuales de tenería para la adsorción de cromo hexavalente, mostró una alta eficacia con un porcentaje de remoción del 94.4%, logrando reducir significativamente la concentración de cromo hexavalente por debajo del límite máximo permitido de 0.1 mg/L, según la legislación de Nicaragua establecida en el Decreto 21-2017, Arto. 47.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuros estudios:

Diseñar un método de extracción de aceite de la semilla de *Moringa oleífera* para evitar la presencia de materia orgánica en suspensión, cuando se da el proceso de adsorción.

Realizar un estudio sobre la cinética de adsorción de cromo hexavalente para determinar la etapa determinante en la velocidad de adsorción en la semilla de *Moringa oleífera*.

Realizar un estudio usando diferente dosis de adsorbente para determinar la relación de equilibrio, entre la cantidad de adsorbente y la concentración del metal.

Realizar estudios para remoción de otros metales y contaminantes orgánicos utilizando la biomasa de la semilla de *Moringa oleífera*, debido a la alta capacidad de remoción mostrada.

Diseñar un proceso de regeneración de la biomasa de semilla de *Moringa oleífera* y/o disposición final del residuo después de estar en contacto con cromo hexavalente.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, E. (2005). *Determinación de Isotermas de adsorción de Fe, Cu y Zn en Quitosana*. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería Química, UNI, Managua, Nicaragua.

Álvarez, A. y Blanco, V. (2019). *Estudio de la cinética y equilibrio de adsorción de aluminio de soluciones acuosas usando quitosano y cascarilla de arroz como bioadsorbentes*. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería Química, UNI, Managua, Nicaragua.

Appelo, C., y Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edition*. A.a. Balkema Publishers: Great Britain.

Arias, C. (2014). *Estudio de las Posibles Zonas de Introducción de La Moringa oleífera Lam. En La Península Ibérica, Islas Baleares E Islas Canarias*. Madrid.

Arteta, R. L. (2007). *¿Cuánto pesa un metro cuadrado de la capa arable del suelo?: ¿Qué es la densidad aparente?*. Recuperado el 15 de junio de 2020, de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/16/65688>.

Barrenechea, M. A. (2005). *Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del Agua*. Lima, Peru.

Bello, O. S., Atoyebi, O. M., Adegoke, K. A., Fehintola E. y Ojo, A. (2015) *Removal of Toxicant Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Different Adsorbents*. J. Chem. Soc. Pak., Vol. 37, 01, pp. 190 - 206.

Centro de Producción más Limpia CNPML, C. N. (2007). *Informe Anual*. Medellín, Colombia.

Centro de Producción más Limpia CPML, C. d. (2008). *Manual de Buenas Prácticas Ambientales*. Managua, Nicaragua.

Duarte, E., Olivero, J., y Jaramillo, B. (2009). *Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosano obtenido de desechos de camarón*. Pereira, Colombia.

Duarte, R., y Rodríguez, I. (1999). *Longitud y Biomasa de Sargassum sinicola Setchell et Gardner (Phaeophyta)*. Bahía Magdalena, México.

Duckman, H. y Brady, N. (1993). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Noriega Editores, México D.G. pp. 590.

EPA, U. E. (1999). *Integrated Risk Information System (IRIS) on Chromium VI*. Washington, DC.

EPA, U. E. (2016). *Chromium Compounds*.

Falasca, S., y Bernabé, M. A. (2008). Potenciales usos y delimitación del área de cultivo de *Moringa oleífera* en Argentina. *Revista Virtual de REDESMA*, 16.

Fernández, J. (2015). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para optimizar el proceso de pelambre en la empresa "curtipiel martínez", parroquia izamba, cantón ambato, provincia de tungurahua, periodo 2013-2014*". Latacunga, Ecuador.

Foidl, N., Mayorga, L., y Vásquez, W. (1999). *Utilización del marango (Moringa oleífera) como forraje fresco para el ganado. Conferencia electrónica de la FAO sobre agroforestería para la producción animal en América Latina*. Roma.

Folkard, G., y Sutherland, J. (1996). *Moringa oleífera. Un árbol con enormes potencialidades*. Turrialba, Costa Rica.

Garces Jaraba, E., y Coavas Romero, C. (2012). *Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (Citrus sinensis) modificada con quitosano para la remoción de cr (vi) en aguas residuales*. Cartagena de Indias, Colombia.

García Granados, I. (2005). *Fundamentos de Ingeniería Ambiental I*. Facultad de Ingeniería Química, UNI, Managua, Nicaragua.

Gerente, C., Lee, C., Cloirec, P., y MacKay, G. (2007). *Application of Chitosan for the removal of metals from wastewater by adsorption-Mechanisms and models review*.

Gonzalez, M. (2010). *Química*. Recuperado el 15 de Enero de 2019, de Química: <https://quimica.laguia2000.com/>

González, M. R., y Gutiérrez, M. G. (2014). *Estudio de adsorción de cromo hexavalente en bentonita termoactivada en lechos agitados*. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería Química, UNI, Managua, Nicaragua.

Hernandez, M., Rivas, H., y Ventura, G. (2017). *Evaluación de la efectividad de la semilla de Teberinto (Moringa oleífera Lam.) como método de remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano*. Ciudad Universitaria.

Hernández, S., Cawich, Z., Gómez, M., y González, C. (2016). *Eficacia de la semilla de Moringa oleífera en el aclaramiento del agua*. Managua, Nicaragua.

- HHS, U. D. (2012). *Toxicological Profile for Chromium*. Atlanta, GA.
- Hines, A. L., y Maddox, R. N. (1984). *Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall.
- Ibarz, A. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Mundi Prensa.
- Kimbrough, D., Cohen, Y., Winer, A., Lynn, C., y Mabuni, C. (1999). *A Critical Assessment of Chromium in the Environment*.
- Kuyucak, N., y Volesky, B. (2008). *Accumulation of cobalt by marine alga. Biotechnology and Bioengineering*.
- Lédo, P., Lima, R., Paulo, J., y Duarte, M. (2009). *Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de Moringa oleífera para la depuración de aguas con baja turbiedad*. Rio Grande do Norte, Brasil.
- López, M. (2012). *Obtención y caracterización de quitosanos modificados ingredientes funcionales con aplicaciones tecnológicas y biológicas en la industria alimentaria*. Madrid, España.
- López, M. (2018). *Evaluación de las Semilla de Moringa oleífera para la Remoción de Fluoruros en Aguas de Consumo Humano*. Quito.
- Martinez, K. I., y Talavera, G. A. (2018). *Influencia de Tres Métodos de Concentración y Secado en el Contenido de Vitamina C y Eficiencia Antioxidante del Extracto de las Hojas de Moringa oleífera*. Managua.
- Murugananthan, M., Raju, G., y Swarna, P. (2004). *Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation*.
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K., y Talbot, B. G. (1995). *Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleífera*. Cairo, Egipto.
- OMS. (2007). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Guías Para la Calidad del Agua Potable:
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf
- Ortega, K. (2014). *Revisión de las características y usos de la planta moringa oleífera*. Barranquilla, Colombia.

Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W. y Baroutian, S. (2008). *Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A Review*. Water Air Soil Pollut. DOI 10.1007/s11270-008-9893-7. pp.

Pardo, A. (2013). *Uso del quitosano para la remoción de cromo y materia orgánica en efluentes de tenería*. maracaibo, Venezuela.

Paz, J., y Del Bosque, G. (2011). *Investigación y desarrollo de producción de moringa para la obtención de biodiesel en México. Fondo Sectorial de Investigación en Materias Agrícola, Pecuaria, Acuicultura, Agrobiotecnología y Recursos Fitogenéticos*.

Pérez, C. (2012). *Moringa oleifera Lam., especie forestal de usos múltiples. Revisión bibliográfica. E.U.I.T. Forestal (U.P.M.)*. Madrid, España.

Raisman, J., y Gonzales, A. (2002). *Impacto de los residuos de las tenerías sobre el ambiente y la salud humana*. Chaco, Argentina.

Rao, S., y Shashikant, M. (1992). *Kinetic studies on adsorption of chromium by coconut shell carbons from synthetic effluents*.

Richard, F., y Bourg, A. (1991). *Aqueous Geochemistry of Chromium: A Review*. .

Rodas, M. I., y Ñurinda, E. d. (2016). *Estudio de adsorción de cromo hexavalente en columna de lecho fijo con biomasa de tamarindo*. Managua.

Rodríguez, S., Muñoz, R., García, O., y Elina, F. (2005). *Empleo de un producto coagulante natural para clarificar agua*. La Habana, Cuba.

Romero, M. L., y Sánchez, S. M. (2018). *Estudio Comparativo de la Aplicación de Quitosano Modificado con Cobre y con Cinc, para la Adsorción de Cromo Hexavalente en el Tratamiento de Aguas Cromo Hexavalente en el Tratamiento de Aguas*. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería Química, UNI, Managua, Nicaragua.

Tejada, C., Villabona, Á., y Garcés, L. (2014). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. Cartagena, Colombia.

Tenorio, E., Nuñez, E., y Guzmán, R. (2008). *Validación de la aplicación de la semilla de Moringa oleifera producida en el sur de Honduras como coagulante natural del agua destinada a consumo humano en la región de Yeguaré, Honduras*. Tegucigalpa, Honduras.

Trivedi, M. K., Tallapragada, R. M., Branton, A., Trivedi, D., Nayak, G., Latiyal O. y S. Jana, (2015). Characterization of physical, thermal and structural properties of chromium (VI) oxide powder: Impact of biofield treatment. *Journal of Powder Metallurgy & Mining*, vol. 4:128. Doi: 10.4172/2168-9806.1000128.

UNICEF. (2002). *Calidad del Agua en 20 pozos del triángulo La Cruz de la India-Darío-San Isidro con énfasis en la presencia de Arsenico*.

USPHS, U. P. (1997). *Toxicological profile for chromium on CD-ROM. Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. Atlanta, USA.

van Loon, G. W. y Duffy, S. J. (2005). *Environmental Chemistry*. Second Edition. Oxford University Press INC., New York, pp. 318.

Volesky, B. (1990). *Removal and recovery of heavy metals by biosorption, en Biosorption of heavy metals*. Florida, USA.

ANEXOS

Anexo A.1 Equipos, Reactivos y Cristalería para los experimentos.

Tabla A.1 Equipos de Laboratorio.

Equipo	Marca
pH-Metro	Orión, modelo 410 A
Espectrofotómetro Ultravioleta Visible	HACH-DR 5000
Horno	-
Balanza Analítica	OHAUS Scout Pro modelo TI-204
Tamiz	-
Agitador magnético	Corning pc-420D
Mortero	-

Tabla A.2 Reactivos.

Reactivo	Concentración
Agua Destilada	-
Agua Desionizada	-
Solución Madre de Cromo VI	1000 mg/L
Solución de Cr (VI) a diferentes concentraciones	5, 20, 50, 100, 300, 500 mg/L
Ácido Clorhídrico concentrado	38%, 12N
Ácido Clorhídrico diluido	0.01 y 1.0 N
Hidróxido de Sodio en lentejas	-
Hidróxido de Sodio en solución	0.3 y 3.0%

Tabla A.3 Materiales y Cristalería de Laboratorio.

Cristalería	Capacidad
Balón Volumétrico	1000 mL, 100 mL y 50 mL
Beaker	2000 mL
Beaker	100 mL
Matraz Erlenmeyer	150 mL y 200 mL
Probeta graduada	1000 mL
Pipeta	50 mL
Probeta graduada	1000 mL
Termómetro	-
Embudo de Filtración	-

ANEXO A.2. Diagrama de Flujos de la preparación de la Semilla de *Moringa Oleífera*.

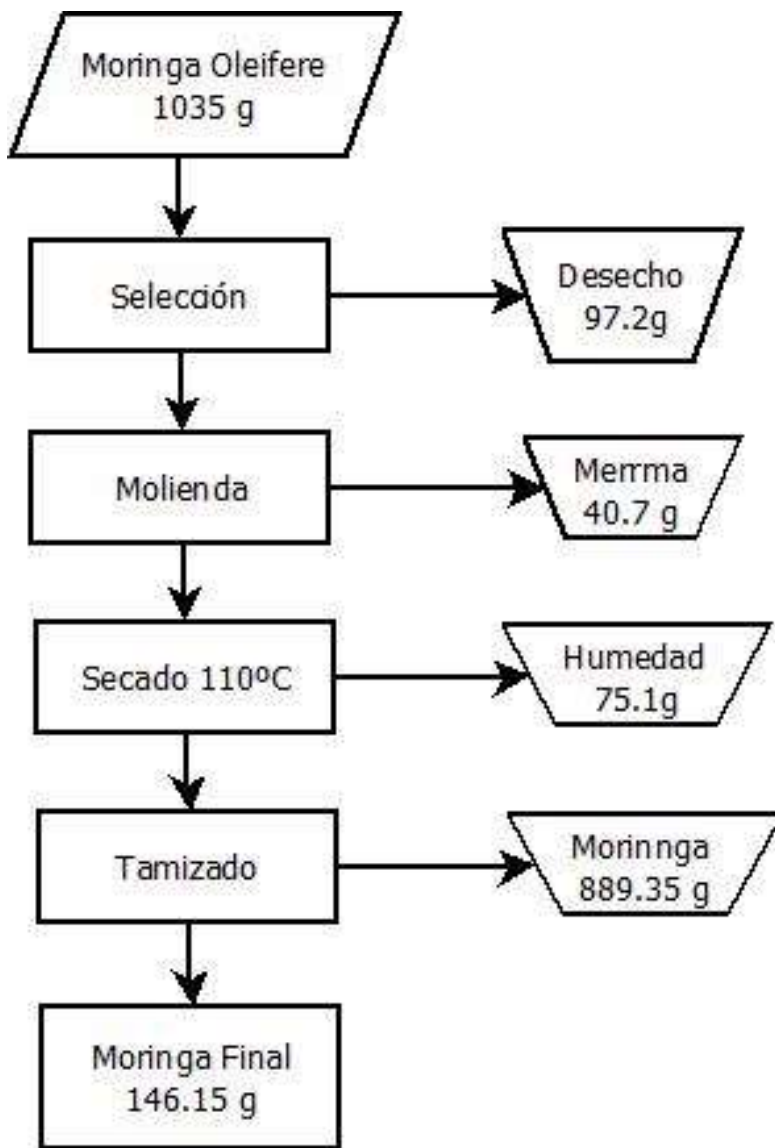


Figura A.1 Diagrama de flujos del proceso de preparación de la semilla de *Moringa oleífera*.

ANEXO A.3. Tablas de Diseño Experimental para el estudio

A.3.1 Diseño Experimental para el estudio del efecto del pH

Tabla A.4 *Diseño Experimental para el estudio del efecto del pH y la masa de adsorbente en la remoción de cromo hexavalente en Moringa oleífera.*

Orden Est.	Orden Corrida	pH	Masa (g)
4	1	5	3
10	2	4	3
1	3	4	1
11	4	5	1
16	5	7	3
6	6	6	3
13	7	6	1
5	8	6	1
15	9	7	1
2	10	4	3
7	11	7	1
12	12	5	3
14	13	6	3
8	14	7	3
9	15	4	1
3	16	5	1

A.3.2 Diseño Experimental para la evaluación de la isoterma de adsorción del cromo hexavalente con semilla triturada de Moringa

Tabla A.5 Diseño Experimental para el estudio de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente en *Moringa oleífera*, a diferentes masas de adsorbente y diferentes concentraciones iniciales del ion metálico.

Orden Est.	Orden Corrida	[Cr] ppm	Masa (g)
7	1	100	1
12	2	300	3
9	3	150	1
11	4	300	1
3	5	10	1
2	6	5	3
1	7	5	1
4	8	10	3
10	9	150	3
6	10	50	3
13	11	500	1
5	12	50	1
8	13	100	3
14	14	500	3

A.3.3 Resultados de los experimentos de adsorción de cromo VI usando diferente masa de adsorbente y a diferentes concentraciones iniciales del ion metálico.

Tabla A.6 Datos experimentales del estudio de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente en *Moringa oleífera*, a diferentes masas de adsorbente y en intervalo de concentración de 5 a 500 mg/L.

Masa = 0.5 g					Masa = 1.5 g				
Conc. Inicial [Cr] mg/L	Conc. Final [Cr]1 mg/L	Conc. Final [Cr]2 mg/L	Conc. Final Media mg/L	%Rem.	Conc. Inicial [Cr] mg/L	Conc. Final [Cr]1 mg/L	Conc. Final [Cr]2 mg/L	Conc. Final Media mg/L	%Rem.
5	0.009	0.007	0.008	99.84	5	0.007	0.006	0.007	99.86
10	0.011	0.011	0.011	99.89	10	0.009	0.009	0.009	99.91
50	0.060	0.080	0.070	99.86	50	0.010	0.038	0.024	99.95
100	0.087	0.143	0.115	99.88	100	0.026	0.038	0.032	99.97
150	0.154	0.198	0.176	99.88	150	0.080	0.080	0.080	99.95
300	0.507	0.410	0.458	99.85	300	0.134	0.161	0.148	99.95
500	0.980	0.920	0.950	99.80	500	0.626	0.820	0.723	99.85

Tabla A.7 Datos experimentales del estudio de las isotermas de adsorción de cromo hexavalente en *Moringa oleífera*, a diferentes masas de adsorbente y en intervalo de concentración de 1000 a 5000 mg/L.

Masa = 0.5 g			Masa = 1.5 g		
Concentración Inicial mg/L	Concentración Final mg/L	%Remoción	Concentración Inicial mg/L	Concentración Final mg/L	%Remoción
1000	50.75	94.93%	1000	38.30	96.17%
2500	150.03	94.00%	2500	128.00	94.88%
5000	306.00	93.88%	5000	276.50	94.47%

Anexo A.4. Determinaciones fisicoquímicas

A.4.1. Calibración de picnómetros

1. Procedimiento para calibración de picnómetros

Los picnómetros deben estar limpios y completamente secos. El procedimiento es el siguiente:

- a) Pesar el picnómetro seco (m_P).
- b) Calentar agua a una temperatura de aproximadamente 70°C sin llegar a ebullición, para eliminar burbujas de aire.
- c) Enfriar el agua y tomar la temperatura.
- d) Llenar cada picnómetro con agua del paso anterior teniendo cuidado de no derramarla sobre la superficie exterior hasta la medida indicada. En caso de derrame, secar la superficie del picnómetro.
- e) Pesar el picnómetro lleno de agua (m_{P+W}).
- f) Calcular el volumen del picnómetro con la siguiente ecuación:

$$V_P = \frac{m_{P+W} - m_P}{\rho_W} \quad (\text{A.1})$$

Donde V_P es el volumen del picnómetro en cm^3 , m_{P+W} es la masa del picnómetro lleno con agua en g, m_P es la masa del picnómetro en g y ρ_W es la densidad del agua a la temperatura de trabajo en g/cm^3 .

En la siguiente tabla se muestran las densidades del agua a diferentes temperaturas:

Tabla A.8 Densidades del agua a diferentes temperaturas.

T°C	g/cm ³	T°C	g/cm ³	T°C	g/cm ³
16	0.9989	21	0.9980	26	0.9968
17	0.9988	22	0.9978	27	0.9965
18	0.9986	23	0.9975	28	0.9962
19	0.9984	24	0.9973	29	0.9959
20	0.9982	25	0.9970	30	0.9957

2. Cálculo del Volumen del picnómetro

Siguiendo el procedimiento anterior, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla A.9 para los dos picnómetros utilizados en los experimentos para la determinación de la densidad real. La densidad del agua a la temperatura de trabajo (25°C) fue de 0.9970 g/cm³.

Tabla A.9 Datos de Volúmenes del Picnómetro

Picnómetro No.	Peso del picnómetro (g)	Peso del picnómetro con agua (g)	Volumen del picnómetro (cm ³)
1	19.745	44.692	25.0220
1	19.745	44.742	25.0722
Promedio del Volumen del picnómetro 1 (cm³)			25.0471
2	19.785	44.668	24.9578

A.4.2 Determinación de pH (Código 10301).

En la siguiente tabla se muestra equipo, materiales y reactivos que se utilizarán para la determinación de pH.

Tabla A.10 Equipo, Materiales y Reactivos para la determinación del pH.

Equipo y Materiales	Reactivos
Medidor de Ph	Agua destilada
Electrodo de referencia de potencial constante	Solución buffer
Electrodo de vidrio	
Termómetro o sensor de temperatura	
Agitador magnético	

1. Procedimiento

a) Calibrar el equipo

Para ello se debe seguir las instrucciones del medidor de pH. En la calibración se usan como mínimo dos de las soluciones buffer, cuyos valores de pH deben cubrir el rango de pH esperado por la muestra a medir.

Llevar los buffers y la muestra a la misma temperatura. (Si el equipo lo permite utilizar compensación de temperatura). El valor correspondiente de pH de los buffers debe ser corregido a la temperatura de los mismos.

b) Medida

Medir el pH de la muestra indicando la temperatura de la misma. Realizar la medida con una agitación moderada para minimizar la entrada de dióxido de carbono y suficiente como para homogeneizar la muestra.

Una vez finalizada la medida enjuagar y secar suavemente los electrodos y proceder a ubicarlos en la solución de preserva de los mismos.

A.4.3 Determinación de Cromo por Espectrofotometría Ultravioleta visible

Todas las soluciones serán preparadas con mucho cuidado, utilizando los equipos y utensilios de laboratorio adecuado y lavado con ácidos, minerales y agua desionizada, para evitar la contaminación de los materiales y la alteración de los resultados que se pretenden obtener.

La concentración de cromo hexavalente se determinó por medio del método Estándar para el análisis colorimétrico (3500-cr) con 1-5 Difenilcarbazida, detallado en la Norma Mexicana NMX-AA-044-SCFI, (2014).

Este método se basa en una reacción química, donde el cromo hexavalente (Cr^{+6}) reacciona con la 1,5-difenilcarbazida en medio ácido para dar un complejo color rojo violeta de composición desconocida que es determinado por Espectrofotometría Ultravioleta-Visible a 540 nm. La intensidad de color es directamente proporcional a la concentración de cromo hexavalente.

1. Obtención de curva de calibración para la determinación de Cr VI

Para la construcción de la curva de calibración, en un intervalo de 10,0 $\mu\text{g/L}$ a 75,0 $\mu\text{g/L}$, se llevó a cabo el siguiente procedimiento, establecido en la Norma Mexicana (2014):

- a) Inicialmente, se preparó una disolución de referencia madre de cromo hexavalente con una concentración de masa de Cr^{+6} de 500 mg/L. Para ello, se disolvió 141,4 mg de dicromato de potasio con agua destilada, en un balón de 100 mL (1mL de esta disolución es equivalente a 500,0 μg de Cr^{+6}). Posteriormente, se preparó una solución patrón de 5 mg/L, diluyendo con agua destilada, 1mL de la disolución de referencia en un balón de 100 mL (1mL de esta disolución es equivalente a 5 μg de Cr^{+6}).
- b) Luego se agregaron volúmenes de la disolución de referencia de trabajo de cromo hexavalente (5 mg/L) en un rango de 2 a 20 mL (2, 5, 10,15 y 20 mL) para lograr estándares en un rango de 10 a 75 μg de Cr VI, dentro de balones de 100 mL, diluyendo con agua destilada.
- c) Cada muestra fue transferida a un matraz de Erlenmeyer de 250 mL y se le adicionaron 0,25 mL (5 gotas) de ácido fosfórico (H_3PO_4) para el desarrollo de color rosado. De acuerdo con el pH de la muestra, se añadió ácido sulfúrico 3 M ó 0.1 M para ajustar a un pH de $2,0 \pm 0,5$.
- d) Posteriormente se preparó una disolución de Difenilcarbazida. Para ello, se pesó 250 mg de este reactivo y se disolvió en 50 mL de acetona. Luego, se agregó 2 mL de la

disolución a cada muestra previamente preparada y se dejaron reposando de 5 min a 10 min hasta que la solución alcanzara por completo el color rosado intenso.

- e) Para la calibración de la medición de la concentración de Cr VI en el Espectrofotómetro UV-V HACH-DR 5000, se fijó una longitud de onda de 540 nm y se ajustó con el blanco de reactivos a cero de absorbancia, utilizando una celda de 1 cm.
- f) Posteriormente, se transfirió una alícuota de cada solución estándar, en orden de menor a mayor concentración, a la celda de absorción de 1 cm, midiéndose su absorbancia a 540 nm. Una vez obtenidos los datos se graficó la Absorbancia vs. los μg de Cr VI, para la construcción de la curva calibración.

2. Gráfico de la curva de calibración

Los datos obtenidos de absorbancia a diferentes concentraciones se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla A.11 Datos de absorbancia en función de la concentración de cromo VI.

No.	Concentración de Cr VI ($\mu\text{g/l}$)	Absorbancia
1	10,00	0,057
2	25,00	0,183
3	50,00	0,597
4	75,00	0,792

En base a los datos de la Tabla A.11 se construyó la curva de calibración de absorbancia en función de la concentración de cromo hexavalente (Figura A.3).

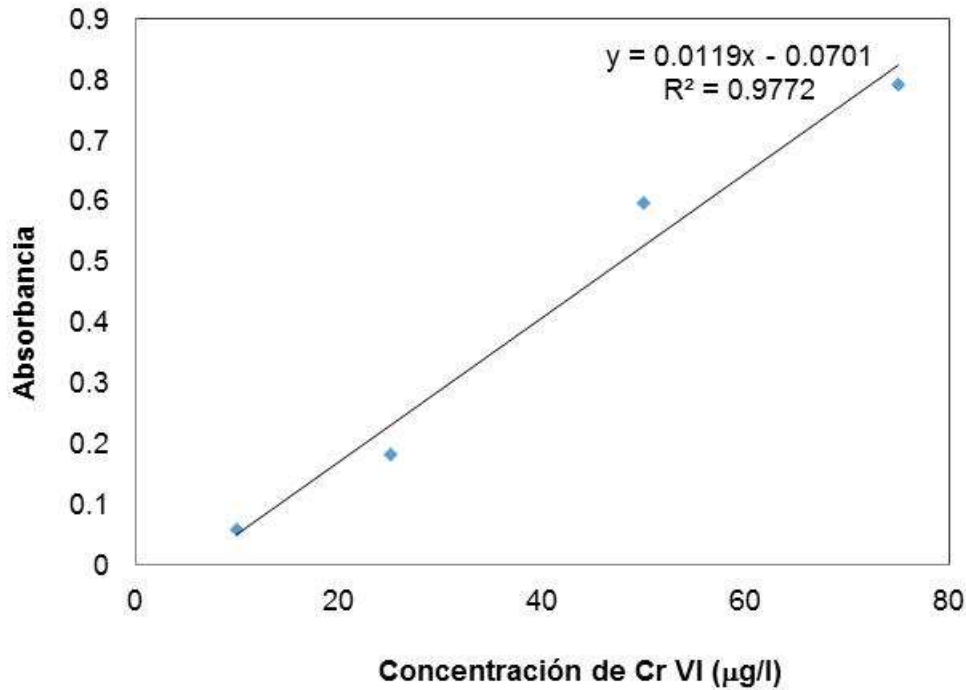


Figura A.2 Curva de calibración de absorbancia en función de la concentración de cromo hexavalente.

3. Determinación de la concentración de Cr VI en muestras sintéticas

Cada muestra fue transferida a un matraz de Erlenmeyer de 250 mL y se preparó siguiendo el procedimiento (c) y (d) del ítem 1 de la obtención de la curva de calibración.

Cuando la solución alcanzó por completo el color rosado intenso, se transfirió una alícuota de la solución a una celda de absorción de 1 cm y se colocó en el espectrofotómetro UV Visible. Posteriormente, se midió su absorbancia a 540 nm.

La concentración de cromo hexavalente en la muestra se determinó a partir de la ecuación de la recta mostrada en la Figura A.3:

$$Y = 0,0119X - 0,0701 \quad (\text{A.1})$$

Donde Y es la absorbancia y X es la concentración de cromo hexavalente en µg/l. Despejando el valor de X, la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$X = \frac{Y+0,0701}{0,0119} \quad (\text{A.2})$$

A.4.4. Pretratamiento de las muestras reales de tenería

El pretratamiento a las muestras de aguas residuales de tenería incluye:

- (i) Filtración, para remover sólidos, pelo u otros elementos contaminantes, y
- (ii) Destrucción de la materia orgánica.

5. Destrucción de materia orgánica en muestras de aguas residuales

Para la destrucción de la materia orgánica presente en la muestra, se mezclaron 25 mL de agua residual con 5 mL de una mezcla (50:50) de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y ácido nítrico concentrado (HNO_3). La solución se calentó en una plancha de calentamiento a 120°C hasta la aparición de vapores de SO_3 . Posteriormente, alícuotas de 5 mL de HNO_3 concentrado fueron adicionadas y la mezcla fue calentada hasta que la solución se puso clara y no se observó la aparición de vapores.

La solución se calentó hasta que quedo seca y se adicionó 15 mL de HNO_3 0,5 % v/v. Esta mezcla se calentó hasta disolver las sales solubles. Posteriormente, la solución fue transferida a un balón aforado de 50 mL y se llevó a la marca de aforamiento con una solución de 0,5 % v/v HNO_3 . A la muestra pre-tratada, se le determinó la concentración de Cr VI utilizando el método de la Difenilcarbazida descrito en el ítem 3 del procedimiento.

ANEXO A5. Fotos

A 5.1 Caracterización de Moringa

Pesaje de la Moringa sin triturar



Tamizado de la semilla Triturada



Medición de la densidad de la Moringa



Equipo para Análisis espectral de IR



A 5.2 Experimentos de determinación del pH óptimo

Muestras a diferentes valores de pH



Espectrofotómetro usado para medir los valores de la concentración final



Soluciones madres para construir la curva de calibración del equipo



A 5.3 Experimentos de adsorción con Moringa

Muestras de agua sintéticas una vez puesta en contacto con la Moringa



Resultado después del proceso con Difenilcarbocida para hacer la lectura en el espectrofotómetro



A 5.4 Experimentos con Muestras de aguas residuales de tenerías

Muestras de aguas residuales de tenerías tratadas para análisis de concentración



Aguas de tenerías una vez tratada con moringa

