

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA SEMILLA DE LA MORA PARA
LA REMOCIÓN DE CROMO EN AGUAS RESIDUALES
DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

RAQUEL IVETTE BERMÚDEZ PATIÑO
raquelbermudez93@gmail.com

DIRECTOR: ING. NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA MSc.
nathalia.valencia@epn.edu.ec

Quito, mayo 2020

DECLARACIÓN

Yo Raquel Ivette Bermúdez Patiño, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

RAQUEL IVETTE BERMÚDEZ PATIÑO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Raquel Ivette Bermúdez Patiño, bajo mi supervisión.

**Ing. NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA MSc.
DIRECTORA DE PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

A Francisco y Loida, por su infinito amor y paciencia. Le agradezco a la vida tenerlos como padres, no habría podido tener mejores maestros en este largo camino, gracias por sus enseñanzas y sacrificios, por siempre haberme brindado mucho más de lo que merezco, por nunca haberse dado por vencidos y perdonar tantas faltas, las palabras se quedan cortas para agradecerles todo lo que han hecho por mí. Espero llegar a ser al menos la mitad de la persona que son ustedes y que se sientan orgullosos de mí, los amo.

A mi familia, por ser una familia hermosa que a pesar de la distancia siempre me ha hecho sentir su amor y apoyo incondicional.

A mis amigos, por haber compartido conmigo esta etapa de la vida.

A la Ing. Nathalia Valencia por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto.

DEDICATORIA

A mi gordo, Junior.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
PRESENTACIÓN	XV
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	4
1.3 ALCANCE.....	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 PROCESO DE CURTIEMBRE.....	6
2.1.1 RIBERA.....	8
2.1.2 CURTIDO.....	8

2.1.3	POST-CURTIDO	9
2.1.4	ACABADO.....	10
2.2	DESCRIPCIÓN Y USO DEL CROMO HEXAVALENTE	10
2.2.1	GENERALIDADES	10
2.2.2	COMPORTAMIENTO DEL CROMO HEXAVALENTE EN LA NATURALEZA	11
2.2.3	EFFECTOS TÓXICOS DEL CROMO HEXAVALENTE.....	13
2.2.4	NORMATIVA	14
2.3	TÉCNICAS DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE	15
2.3.1.	PRECIPITACIÓN QUÍMICA.....	15
2.3.2.	PRECIPITACIÓN ELECTROQUÍMICA.....	15
2.3.3.	FILTRACIÓN POR MEMBRANAS.....	16
2.3.4.	ADSORCIÓN.....	16
2.4	LA SEMILLA DE LA MORA.....	21
CAPITULO 3.....		23
METODOLOGÍA.....		23
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ADSORBENTE	23
3.2	SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA SEMILLA DE LA MORA	24
3.2.1	SECADO Y TRITURADO	24
3.2.2	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SATURACIÓN DE LA SEMILLA DE LA MORA.....	24
3.2.3	OBTENCIÓN DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN	25
3.3	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LA SEMILLA DE MORA.....	25
3.3.1	PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE CROMO	26
3.3.2	PRUEBA 1.....	26

3.3.3 PRUEBA 2.....	27
CAPITULO 4.....	28
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	28
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE MORA	28
4.1.1 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS.....	28
4.1.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	29
4.2 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CROMO.....	34
4.2.1. ANÁLISIS DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN PARA CADA VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	34
4.2.2. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN OBTENIDA EN UNA MUESTRA DE CURTIEMBRE.....	38
CAPITULO 5.....	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1 CONCLUSIONES	40
5.2 RECOMENDACIONES	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
ANEXOS.....	54
ANEXO I. PROCEDIMIENTOS PARA CARACTERIZAR EL MATERIAL.....	55
a) Humedad.....	56
b) Lignina.....	56
c) Holocelulosa.....	57
d) Celulosa	57
e) Hemicelulosa.....	58
ANEXO II. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ISOTERMAS DE LANGMUIR Y FREUNDLICH	59
a) Tiempo de equilibrio	60

b)	Construcción de isothermas	60
c)	Cálculos para la construcción de la Isotherma de Langmuir	60
d)	Cálculos para la construcción de la isotherma de Freundlich.....	61
ANEXO III. CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA SEMILLA DE MORA.....		63
a)	Cálculo del contenido de humedad.....	64
b)	Cálculo del contenido de lignina	64
c)	Cálculo del contenido de holocelulosa	65
d)	Cálculo del contenido de celulosa.....	65
e)	Cálculo del contenido de hemicelulosa	66
ANEXO IV. DATOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE ADSORCIÓN.....		67
a)	Tamaño de partícula.....	68
b)	Masa de adsorbente	69
c)	pH.....	71
d)	Concentración inicial de Cr (VI)	72
e)	Humedad.....	73
f)	Lignina.....	73
g)	Holocelulosa	73
h)	Celulosa	73
i)	Hemicelulosa	74
ANEXO V. REGISTRO FOTOGRÁFICO		75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Efectos causados por el Cr (VI) en la salud humana	13
Tabla 2.2 Límites máximos permisibles para el Cr (VI)	14
Tabla 2.3 Eficiencias de remoción de Cr (VI) utilizando desechos agroindustriales.....	17
Tabla 2.4 Factores que influyen en la adsorción	18
Tabla 3.1 Métodos y equipos utilizados en la caracterización de la semilla de mora.....	23
Tabla 3.2 Condiciones experimentales aplicadas en el estudio.....	27
Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de mora	28
Tabla 4.2 Parámetros calculados de la isoterma de Langmuir	32
Tabla 4.3 Parámetros calculados de la isoterma de Freundlich	33
Tabla 4.4 Remoción de Cr (VI) usando semilla de mora para una variación de la concentración inicial de cromo	38
Tabla 4.5 Resultados de remoción de Cr (VI) en muestras de aguas residuales de curtiembre usando semilla de mora como adsorbente	39
Tabla 2A Datos experimentales para la determinación del tiempo de equilibrio.....	60
Tabla 2B Datos experimentales para la construcción de las isotermas	60
Tabla 2C Datos experimentales para la construcción de la Isoterma de Langmuir.....	60
Tabla 2D Datos experimentales para la construcción de la Isoterma de Freundlich	61
Tabla 4A Datos experimentales para la variación del tamaño de partícula.....	68
Tabla 4B Datos experimentales para tamaño de partícula de 212 μm	68
Tabla 4C Datos experimentales para tamaño de partícula de 300 μm	68
Tabla 4D Datos experimentales para tamaño de partícula de 425 μm	69
Tabla 4E Datos experimentales para la variación de dosis de adsorbente	69
Tabla 4F Datos experimentales para dosis de adsorbente de 1 gramo	69

Tabla 4G Datos experimentales para dosis de adsorbente de 3 gramos	70
Tabla 4H Datos experimentales para dosis de adsorbente de 5 gramos.....	70
Tabla 4I Datos experimentales para dosis de adsorbente de 9 gramos	70
Tabla 4J Datos experimentales para dosis de adsorbente de 10 gramos	71
Tabla 4K Datos experimentales para la variación de pH	71
Tabla 4L Datos experimentales para pH de 2,7	71
Tabla 4M Datos experimentales para pH de 3	72
Tabla 4N Datos experimentales para pH de 4.....	72
Tabla 4O Datos experimentales de la remoción de Cr (VI) usando semilla de mora para una variación de la concentración inicial de cromo	72
Tabla 4P Contenido de humedad de la semilla de mora	73
Tabla 4Q Contenido de lignina en la semilla de mora	73
Tabla 4R Contenido de holocelulosa en la semilla de mora	73
Tabla 4S Contenido de celulosa en la semilla de mora	73
Tabla 4T Contenido de hemicelulosa en la semilla de mora.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama del proceso de curtido.....	7
Figura 2.2 Esquema de la etapa de ribera	8
Figura 2.3 Esquema de la etapa de curtido.....	9
Figura 4.1 Tiempo de equilibrio en función de la capacidad de adsorción de la semilla de mora como adsorbente de Cr (VI) en solución.....	30
Figura 4.2 Datos de equilibrio de la semilla de mora como adsorbente en la remoción de Cr (VI)	31
Figura 4.3 Forma linealizada de la isoterma de Langmuir para la remoción de Cr (VI) mediante la utilización de semilla de mora como adsorbente	32
Figura 4.4 Forma linealizada de la isoterma de Freundlich para la remoción de Cr (VI) mediante la utilización de semilla de mora como adsorbente	33
Figura 4.5 Influencia del tamaño de partícula en la remoción de Cr (VI) usando semilla de mora en función de la capacidad de adsorción	35
Figura 4.6 Influencia de la dosis de adsorbente en la remoción de Cr (VI) con semilla de mora en función de la capacidad de adsorción	36
Figura 4.7 Influencia del pH en la remoción de Cr (VI) con semilla de mora en función de la capacidad de adsorción	37
Figura 5 a Semilla de mora lavada.....	76
Figura 5 b Secado natural de la semilla de mora	76
Figura 5 c Pesado de la semilla de mora para su caracterización	77
Figura 5 d Determinación de hemicelulosa en la semilla de mora	77
Figura 5 e Determinación de celulosa en la semilla de mora.....	78
Figura 5 f Determinación de la dosis de adsorbente óptima	79
Figura 5 g Determinación del pH óptimo	79
Figura 5 h Prueba realizada en la muestra de agua de curtiembre	80
Figura 5 i Determinación de Cr (VI): Reacción colorimétrica	80

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials (por sus siglas en inglés)
b	Constante de afinidad de adsorción entre el adsorbato y el adsorbente (L/mg)
BCE	Banco Central del Ecuador
C_e	Concentración inicial del material (mg/L)
C_f	Concentración final del material (mg/L)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas en inglés)
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
K₂CrO₄	Cromato de potasio
k_F	Constante de la capacidad de adsorción (L/mg)
m	Masa de adsorbente (g)
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
n	Constante de la intensidad de adsorción
OMS	Organización Mundial de la Salud
pH	Potencial hidrógeno
q_e	Capacidad de adsorción (mg/g)
q_{max}	Cantidad máxima de máxima de adsorción que ocurre en la monocapa (mg/g)
rpm	Revoluciones por minuto
V	Volumen de la solución (L)

RESUMEN

Con el objetivo de proponer alternativas de tratamiento para la remoción de Cr (VI), la presente investigación evalúa a la semilla de mora, residuo de la industria de producción de pulpa de fruta, como material adsorbente de bajo costo en solución acuosa, caracterizando sus propiedades fisicoquímicas.

Como pretratamiento al material elegido, se realizó un secado a 105°C, para posteriormente triturarlo a un tamaño de partícula entre 212 y 425 μm , mismo que fue tamizado para separar en tres tamaños de material: 212 μm , 300 μm y 425 μm . El material resultante fue caracterizado por medio de su contenido de humedad, lignina, celulosa, holocelulosa y hemicelulosa.

Para evaluar la remoción de Cr (VI) se utilizaron reactores batch manteniendo una mezcla completa con ayuda de un equipo de prueba de jarras. Se determinaron las condiciones óptimas para la remoción de Cr (VI), con la variación de tamaño de partícula, dosis de adsorbente, tiempo de contacto, pH y concentración inicial de cromo.

Los resultados experimentales para la adsorción de Cr (VI) con semilla de mora se ajustaron a la isoterma de Freundlich, con una capacidad de remoción de 0,53 mg/g a 17°C, utilizando 10 gramos de adsorbente con un tamaño de 425 μm y una eficiencia de remoción de 92,77%.

Adicionalmente, se aplicó esta tecnología a una muestra de agua proveniente de una curtiembre de la ciudad de Picaihua, con una eficiencia de remoción de cromo de 96.4% y una concentración final de Cr (VI) de 0,2 mg/L, cumpliendo con los límites máximos permisibles.

Palabras clave: adsorción, aguas residuales, cromo hexavalente, semilla de mora

ABSTRACT

With the objective of proposing treatment alternatives for the removal of Cr (VI), the present investigation evaluates the blackberry seed, residue of the fruit pulp production industry, as a low-cost adsorbent material in aqueous solution, characterizing its physicochemical properties

As a pretreatment to the chosen material, drying was carried out at 105 ° C, to subsequently crush it to a particle size between 212 and 425 µm, which was screened to separate into three material sizes: 212 µm, 300 µm and 425 µm. The resulting material was characterized by its moisture content, lignin, cellulose, holocellulose and hemicellulose.

To evaluate the removal of Cr (VI) batch reactors were used, maintaining a complete mixture with the help of a jar tester equipment. The optimal conditions for the removal of Cr (VI) were determined, with the variation of particle size, adsorbent dose, contact time, pH and initial chromium concentration.

The experimental results for the adsorption of Cr (VI) with blackberry seed were adjusted to the Freundlich isotherm, with a removal capacity of 0.53 mg/g at 17°C, using 10 grams of adsorbent with a size of 425 µm and a removal efficiency of 92.77%.

Additionally, this technology was applied to a sample of water from a tannery in the city of Pícahua, with a chromium removal efficiency of 96.4% and a final Cr (VI) concentration of 0.2 mg/L, complying with the maximum permissible limits.

Keywords: adsorption, wastewater, hexavalent chromium, blackberry seed

PRESENTACIÓN

En este proyecto se busca analizar la capacidad de adsorción de la semilla de mora para la remoción de Cr (VI) de aguas residuales de la industria de curtiembre, a continuación, se detallan sus capítulos:

En el **Capítulo 1**, se realiza una introducción al tema, así como, la justificación de la investigación y los objetivos propuestos.

En el **Capítulo 2**, se exponen los principales aspectos del Cr (VI), como su toxicidad, técnicas de remoción y normativa ambiental, además, se incluyen los modelos isotérmicos de adsorción.

En el **Capítulo 3**, se detallan las etapas de la metodología aplicada en el proyecto para la remoción de cromo y la determinación de los modelos isotérmicos.

En el **Capítulo 4**, se reportan los resultados obtenidos en la caracterización del material, en la construcción de modelos isotérmicos, en la aplicación práctica y las eficiencias de remoción.

En el **Capítulo 5**, se exponen las conclusiones obtenidas del estudio y se realizan recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, la manufactura ocupa un puesto importante dentro de la economía del país, al representar un 23% del sector económico, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2012) el 8,2% de esta producción corresponde a la fabricación de calzado de cuero. Estimaciones del Banco Central del Ecuador (BCE) indican que alrededor del 1,15% de la industria se dedica a la elaboración de otro tipo de productos de cuero (Ministerio de Industrias y Productividad, 2011b).

La industria de curtiembre requiere de un excesivo consumo de agua, dado que la mayoría de sus etapas utilizan entre 40 y 45 L/kg de piel cruda para el procesamiento del cuero (Sundar et al., 2001), lo que genera enormes cantidades de residuos sólidos y aguas residuales con concentraciones elevadas de químicos, pudiendo variar el contenido de éstos de acuerdo con la tecnología, químicos y métodos utilizados en el proceso (Ozdemir, Karatas, Dursun, Argun, & Dogan, 2005).

La transformación de piel cruda en cuero se realiza mediante la aplicación de diferentes operaciones físicas y químicas, siendo el uso de sales de cromo trivalente (III) el procedimiento más frecuentemente empleado, debido a que las pieles tratadas con estas sustancias cuentan con una mayor resistencia física, permitiendo tener un mejor control del proceso de curtido (Basegio, Beck Leño, Bernardes, & Bergmann, 2009).

Aproximadamente entre el 60 y 70% de la sal de cromo es aprovechada en el proceso, el resto de la sal permanece en el flujo (Louhab, Sahmoune, Addad, & Barr, 2008). Durante el resto del procedimiento el cromo (III) se puede oxidar a Cr (VI) ocasionando serios problemas ambientales (Xavier, Logeswari, Mano, Thirumarimurugan, & Kannadasan, 2013). Así mismo, se ha reportado que el Cr

(VI) es altamente tóxico y presenta efectos crónicos, potencialmente cancerígenos, en la salud del ser humano (Belay, 2010).

Se han utilizado variadas técnicas para la remoción de Cr (VI) de las aguas residuales de la industria de curtiembre, como precipitación de metales pesados, adsorción con carbón activado, oxidación y reducción electroquímica, vitrificación y encapsulación, las cuales han tenido una buena eficiencia de remoción pero no han sido favorables debido a sus altos costos y requerimientos (Niculescu, Ionittă, & Filipescu, 2010).

1.1 ANTECEDENTES

La industria de la curtiembre se encuentra concentrada en la provincia del Tungurahua, ya que aquí se localiza el 76% de las empresas del país, especialmente en el cantón Ambato (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato Dirección de Gestión Ambiental, 2012). En su mayoría, esta industria se lleva a cabo de manera artesanal, provocando una serie de afectaciones al ambiente debido al consumo excesivo de agua y a la descarga de efluentes contaminados con sales de cromo (Gordillo & Toledo, 2013).

Se estima que en el país se genera un volumen de aguas residuales industriales de 55,2 millones de metros cúbicos por año, llegándose a tratar apenas un 8% (Paredes, 2015). Adicionalmente, se ha registrado un gran deterioro en los cuerpos de agua del país debido a un incremento en las descargas industriales y domésticas (Otiniano, Tuesta, Robles, Luján, & Chavez, 2007). En general, las curtiembres del país no realizan ningún tratamiento a sus aguas residuales antes de realizar las descargas (Arellano, 2014).

En las provincias de Tungurahua y Cotopaxi, la descarga diaria de desechos industriales ha provocado que se evidencie un avanzado deterioro ambiental en sus cuerpos de agua como en el río Cutuchi y río Ambato (Ruiz, Mayorga,

Mantilla, & López, 2016). En estudios realizados en el río Ambato, se estima que el 65% del total de las aguas residuales que recibe provienen de las curtiembres artesanales (Tayupanda, 2010).

En el proceso de curtido, para obtener un producto de calidad y una piel resistente se utiliza agentes de curtido como sales de cromo (III), en esta fase se tiene un alto consumo de agua, además, durante esta etapa el cromo no se fija en su totalidad al cuero, por lo que entre el 30 y 40% de éste es arrastrado en la corriente junto a los efluentes líquidos (Hidalgo, 2015). Debido a la baja eficiencia del proceso, se tiene como resultado descargas con volúmenes considerables de contaminantes, por lo que en el curtido tradicional se puede tener entre 2 a 5 kg de carga contaminante de cromo por tonelada de cuero crudo (Portilla, 2013).

La principal problemática ambiental se da durante el proceso de curtido, ya que se puede oxidar el cromo trivalente a hexavalente, siendo éste más móvil y tóxico, representando un gran riesgo para la salud por ser cancerígeno (Grefa, 2012). Estudios han revelado que las concentraciones de parámetros físicos y químicos del río Ambato incumplen con la normativa ambiental (Molina, 2014). Investigaciones previas han encontrado descargas con concentraciones de cromo (VI) de hasta 160 mg/L, mientras que el límite máximo permisible en la normativa vigente es de 0,5 mg/L (Medina, 2016).

Los métodos convencionales para la remoción de cromo son costosos o ineficientes, por lo que se proponen tecnologías como la bioadsorción, la cual utiliza mecanismos fisicoquímicos para captar las especies químicas utilizando una biomasa, ya sea viva o muerta (Pinzón & Cardona, 2010). Se han realizado estudios que han utilizado desechos orgánicos para la recuperación de metales pesados de efluentes, mismos que han dado resultados favorables (I. Acosta, López, Coronado, Cárdenas, & Martínez, 2010).

Este estudio nace por el interés de evaluar la capacidad de adsorción de cromo (VI) utilizando la semilla de mora, residuo de la industria alimenticia de la pulpa, mediante contacto en un reactor batch. Se ha elegido este material ya que debido a las condiciones edafoclimáticas del país se puede conseguir durante todo el año, además de tener un bajo costo de adquisición (Calero, 2010).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la capacidad de adsorción de cromo (VI) de la semilla de la mora, mediante pruebas en reactores batch, para ser aplicada en sistemas de tratamiento de efluentes de la industria de curtiembre.

1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Construir las isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich de la semilla de mora mediante pruebas batch, para determinar a qué mecanismo de adsorción se ajusta mejor.
- Determinar la influencia del tamaño de partícula en las eficiencias de adsorción de cromo (VI) mediante pruebas en reactores batch para establecer el tamaño óptimo de adsorción.
- Evaluar la capacidad de adsorción del material ante variaciones de dosis de adsorbente, pH y tiempos de contacto mediante pruebas en discontinuo (batch), para determinar las condiciones óptimas de tratamiento.
- Evaluar la remoción de cromo (VI) con la aplicación de la semilla de mora en un efluente de curtiembre mediante pruebas en reactores batch, para

identificar el porcentaje de variación de la eficiencia de remoción encontrada en los ensayos experimentales.

1.3 ALCANCE

La presente investigación, busca analizar el uso de la semilla de mora como adsorbente para reducir las concentraciones de cromo (VI) en aguas residuales de la industria de curtiembre. Con el objetivo de hallar una alternativa de tratamiento de bajo costo, fácil aplicación, operación y mantenimiento, para que así pueda ser implementado en las curtiembres artesanales del país y cumplir con la normativa ambiental vigente.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Con el fin de encontrar procesos alternativos para la remoción de metales pesados se han llevado a cabo investigaciones de adsorción de Cr (VI) utilizando residuos agroindustriales con resultados favorables por lo que es de gran interés el análisis de otros materiales de desecho (Acosta et al., 2010). Esta investigación aportará nuevos conocimientos mediante el análisis de la semilla de la mora como bioadsorbente, ya que este material ha sido poco estudiado y es de fácil acceso al ser considerado como residuo orgánico.

La mayoría de métodos convencionales utilizados para remover cromo son costosos e ineficientes, motivo por el cual las curtiembres artesanales del país no cuentan con un método adecuado de tratamiento para sus efluentes (Gordillo & Toledo, 2013). El presente proyecto tiene la finalidad de proponer una técnica de tratamiento sencilla, eficiente y económica.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

La mayor elaboración de productos de cuero del país está localizada en la región Sierra, donde aproximadamente el 97% de la producción nacional está distribuida entre las provincias de Azuay, Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua (Ministerio de Industrias y Productividad, 2011a). De acuerdo con la Asociación Nacional de Curtidores Ecuatorianos (ANCE), en Tungurahua se encuentran alrededor de 1770 empresas artesanales dedicadas a la industria de la curtiembre (Ruiz et al., 2016).

En su mayoría, estos talleres realizan sus descargas sin realizar un tratamiento y solo en algunos casos se aplican procesos primarios para su depuración (cribado, trampas de grasa y sedimentación), los cuales resultan insuficientes para cumplir con la normativa ambiental vigente, generando efluentes con altas cargas de materia orgánica y compuestos químicos (Fernández & Verduga, 2014).

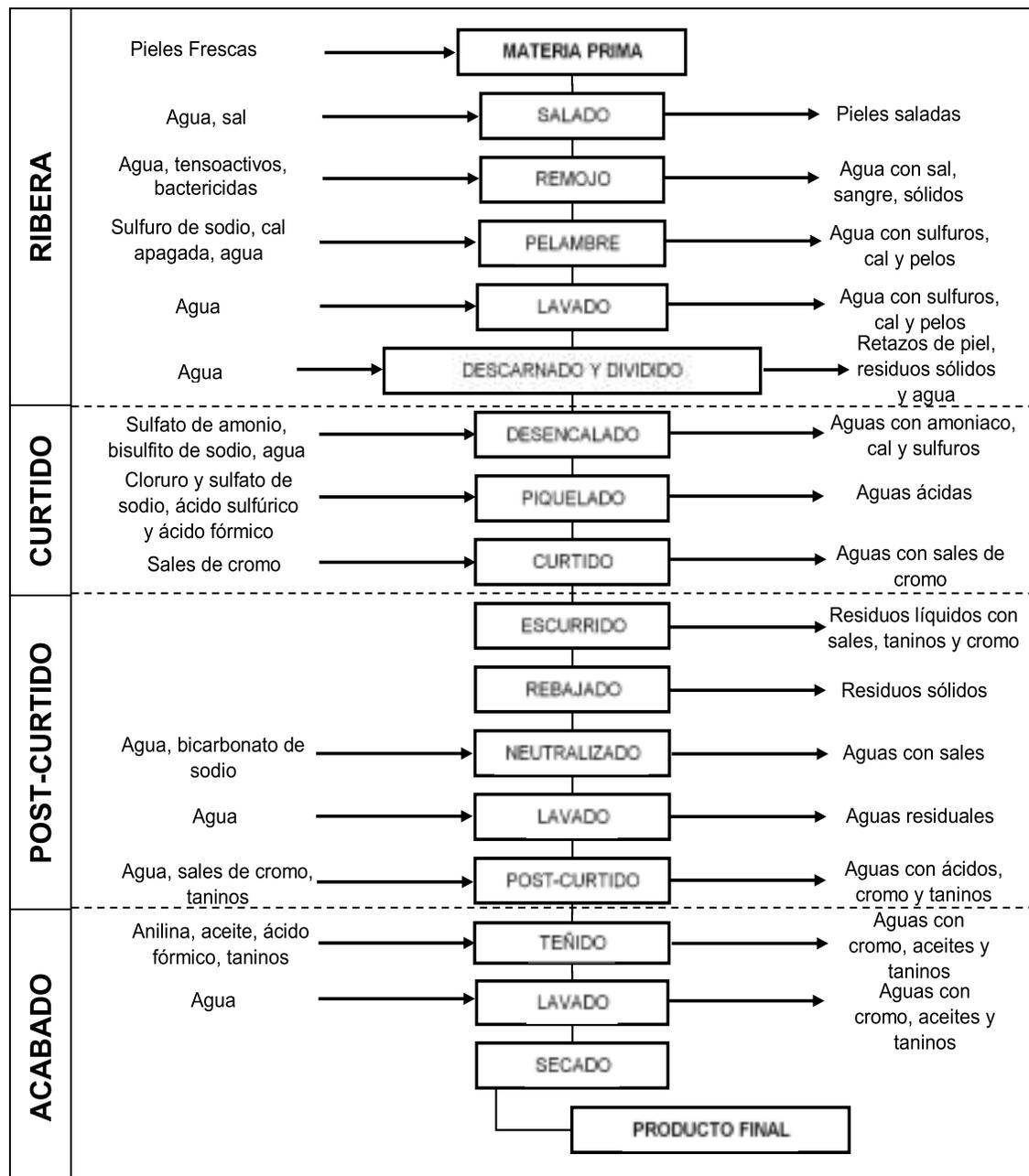
2.1 PROCESO DE CURTIEMBRE

Se conoce como curtiembre al procedimiento que convierte las pieles de animales, generalmente bovinos, en cuero a través de la aplicación de diferentes operaciones físicas y químicas con la finalidad de conseguir un material resistente y versátil (Medina, 2016).

En el Ecuador, el proceso llevado a cabo en curtiembres medianas, grandes y de tipo artesanal, cuenta con 4 etapas principales que son: ribera, curtido, post-curtido y acabado, pudiendo existir variaciones en las dos últimas etapas de acuerdo con el producto final deseado (Alegría & Echegaray, 2017). En la Figura

2.1 se puede observar el diagrama del proceso de curtiembre, estableciendo las respectivas entradas y salidas que tiene cada subproceso.

Figura 2.1 Diagrama del proceso de curtido



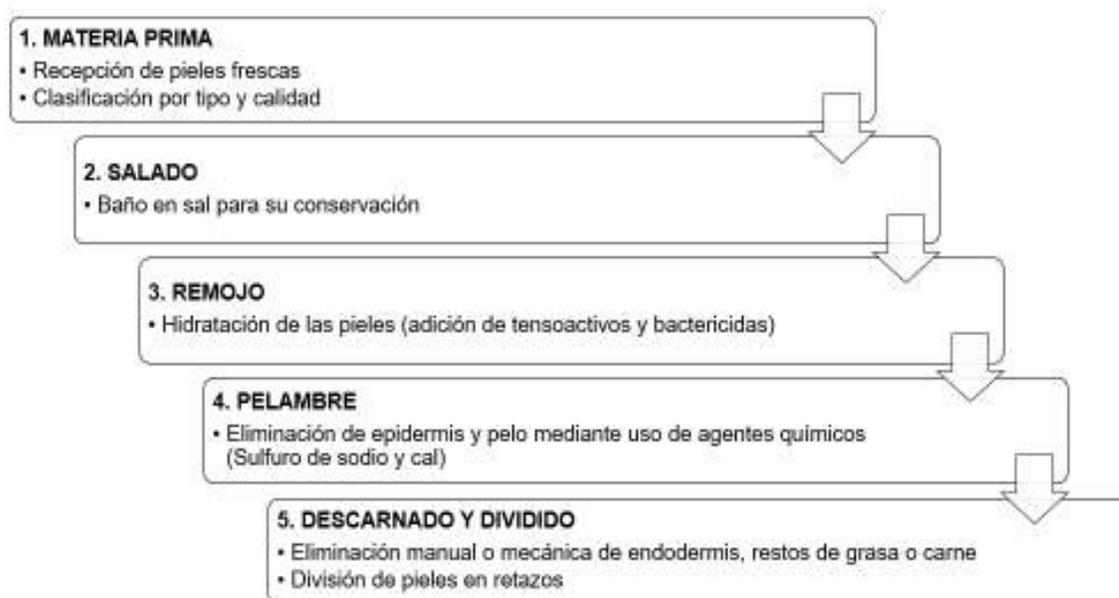
Fuente: Portilla (2013) y Romero (2015)

Elaborado por: Bermúdez (2018)

2.1.1 RIBERA

En esta etapa se recibe la materia prima para proceder a la eliminación del pelo y limpieza de la piel, se la realiza en cilindros de madera o acero inoxidable conocidos como fulones (Hidalgo, 2015), en la Figura 2.2 se detallan los subprocesos ejecutados.

Figura 2.2 Esquema de la etapa de Ribera



Fuente: Hidalgo (2015)

Elaborado por: Bermúdez, 2018

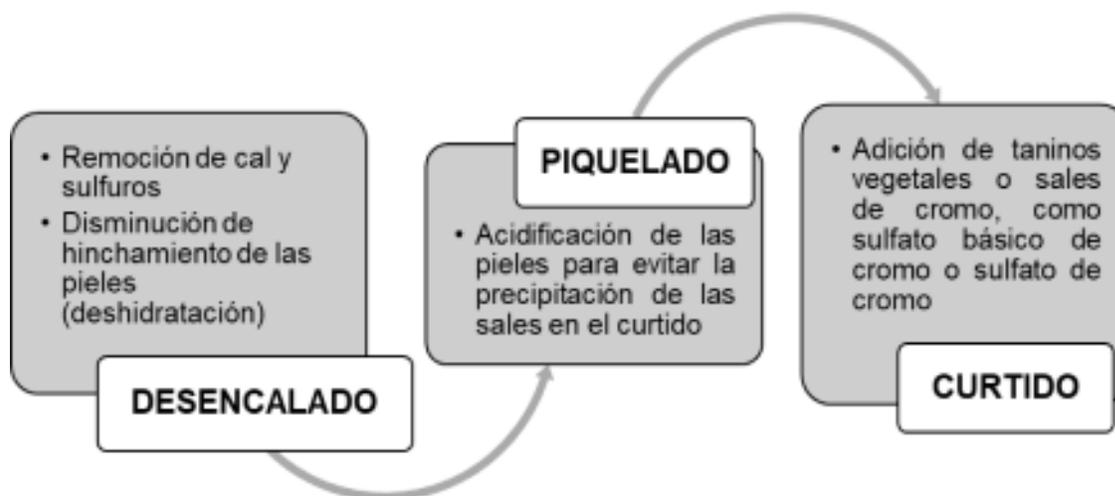
2.1.2 CURTIDO

El curtido tiene como propósito conseguir que el material tenga una mayor resistencia al deterioro, evitando su degradación biológica o física, siendo los agentes curtientes más comúnmente usados los taninos vegetales y las sales de cromo (Salas, 2012).

En el curtido vegetal se utilizan taninos provenientes de la corteza de árboles, dando como resultado un cuero más grueso y duro, en cambio el uso de sales

de cromo les brinda a las pieles una mayor resistencia mecánica, por lo que se obtiene un cuero más delgado y suave (Corredor, 2006). En la Figura 2.3 se describen los procedimientos efectuados en esta etapa.

Figura 2.3 Esquema de la etapa de Curtido



Fuente: Corredor, 2006

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Puesto que las sales de cromo no penetran completamente las pieles, el remanente permanece en el proceso hasta ser descargado junto con el resto de las aguas residuales, originando serios problemas ambientales (Louhab et al., 2008).

2.1.3 POST-CURTIDO

En la etapa de post-curtido, se escurre y rebaja el cuero para disminuir su contenido de agua y espesor, a continuación se realiza un lavado y neutralizado de las pieles, aumentando así su pH (Cabeza et al., 1998). Para que el cuero adquiriera las características necesarias se efectúa nuevamente un curtido, con la finalidad de hacerlo más suave e impermeable (Alegría & Echegaray, 2017).

2.1.4 ACABADO

En el acabado, mediante el teñido se le da al cuero las características deseadas en el producto, para finalmente ser lavado y secado (Romero, 2015).

2.2 DESCRIPCIÓN Y USO DEL CROMO HEXAVALENTE

El cromo es un metal de transición, que cuenta con un gran rango de estados de oxidación, siendo la trivalente y hexavalente sus formas más comunes. Tiende a existir principalmente en su estado trivalente en la naturaleza, ya que es el más estable energéticamente, además de que, en cantidades pequeñas, es un nutriente esencial para plantas y animales, tiene variados usos industriales y comerciales, al ser utilizado ampliamente en las industrias refractaria, química y metalúrgica (Ndlovu, Simate, & Matinde, 2017).

Al contrario del Cr (III) que presenta una baja capacidad tóxica, en su forma hexavalente es mejor absorbido por las células por lo que tiene un alto potencial tóxico, pudiendo causar graves daños a la salud humana, especialmente al sitio de exposición, sistema respiratorio y tracto gastrointestinal (Melnick & Everitt, 2008).

2.2.1 GENERALIDADES

El cromo es un elemento metálico, que no se encuentra en su forma elemental en el ambiente, por lo que usualmente se extrae de la cromita (FeCr_2O_4) (Toxic Use Reduction Institute, 2006). Adicionalmente, se ha podido evidenciar al cromo en sus estados divalente, tetravalente y pentavalente en varios compuestos, pero a causa de su inestabilidad no pueden encontrarse en fuentes naturales (Kwikima & Lema, 2017).

A pesar de que el Cr (III) es hallado en largos depósitos de minerales, en su estado hexavalente es casi imposible que se forme de manera natural, por lo que su presencia en el ambiente será producto de algún tipo de actividad antropogénica (Proctor, 1997). Su toxicidad genera un gran problema ambiental, dado que tiene una alta solubilidad y movilidad, se puede transportar en sus fases sólida y líquida, contaminando así suelo, aire, agua superficial y subterránea (Ndlovu et al., 2017).

2.2.2 COMPORTAMIENTO DEL CROMO HEXAVALENTE EN LA NATURALEZA

2.2.2.1. Agua

El cromo ingresa a las corrientes de agua mediante la erosión o desgaste de rocas y minerales que lo contengan, también por lixiviación de suelos y descargas de aguas residuales que realizan las industrias hacia los cuerpos de agua (Khan et al., 2016).

En el ambiente acuático, el cromo puede sufrir varios procesos como: reducción, oxidación, sorción, desorción, disolución y precipitación, por ejemplo, los iones de cromato y dicromato son altamente solubles bajo cualquier condición de pH, pero pueden ser precipitados con ciertos cationes divalentes, como hierro y cobre (Oliveira, 2012). La reducción del Cr (VI) a trivalente se da bajo la presencia de un agente reductor adecuado, como hierro o sulfuros, además de ser afectada por la luz solar es favorecida por valores de pH ácidos (Kimbrough, Cohen, Winer, Creelman, & Mabuni, 1999).

2.2.2.2. Aire

No es posible encontrar al cromo en estado gaseoso en el medio ambiente debido a que tiene un punto de ebullición extremadamente alto (2676 °C) (Khan

et al., 2016). Por lo tanto en el aire, se tiene la presencia de cromo en forma de aerosoles, siendo éste eliminado mediante deposición húmeda y seca (Organización Mundial de la Salud, 2008). Tiende a ser transportado por el viento, por lo que puede terminar siendo depositado en el agua o suelo (Toxic Use Reduction Institute, 2006).

En la atmósfera, el cromo proviene de fuentes naturales como incendios forestales, actividad volcánica y arena arrastrada por el viento, en cuanto a fuentes antropogénicas, las emisiones pueden provenir de industrias, de combustión de gas natural, aceite y carbón, de plantas de producción de cemento y de emisiones de escape de convertidores catalíticos (Saha, Nandi, & Saha, 2011).

2.2.2.3. Suelo

La concentración de cromo en el suelo varía de acuerdo al tipo de roca madre y a las actividades humanas realizadas en la zona (Asfaw, Tadesse, & Ewnetie, 2017). Así como en ambientes acuáticos, en el suelo el cromo también es controlado por procesos de oxidación, reducción, precipitación, disolución, sorción y desorción (Zayed & Terry, 2003).

En el suelo, el Cr (VI) puede ser reducido a su forma trivalente por sulfuros, hierro, vanadio y materia orgánica, sin embargo cuando se supera su capacidad reductora, el cromo puede permanecer en éste durante años, especialmente si es arenoso o presenta poca materia orgánica (Oliveira, 2012). La sorción de cromo se da en presencia de aluminio, óxidos de hierro o materia orgánica, siendo el pH un factor muy importante en estos procesos (Kimbrough et al., 1999)

2.2.3 EFECTOS TÓXICOS DEL CROMO HEXAVALENTE

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado al Cr (VI) en el grupo 1, por lo que se considera como un elemento cancerígeno para los seres humanos (Organización Mundial de la Salud, 2008). Las principales efectos tóxicos asociados al contacto con Cr (VI) son afecciones respiratorias, gastrointestinales, inmunológicas, hematológicas, oculares, dermatológicas y reproductivas (Agency for Toxic Substances & Disease Registry, 2018). En la Tabla 2.1 se detallan los efectos causados por el Cr (VI) en la salud humana.

Tabla 2.1 Efectos causados por el Cr (VI) en la salud humana

Sistema	Efectos
Respiratorio	Irritación nasal, asma, atrofia de la mucosa, disminución de la función pulmonar, edema pulmonar, bronquitis, bronconeumonía, edema pulmonar, paro cardiopulmonar, aumento de riesgo de cáncer al pulmón y muerte
Gastrointestinal	Dolor abdominal, vómito, ulceración gastrointestinal, hemorragia, necrosis, diarrea hemorrágica, úlceras orales, riesgo de cáncer al estómago y tracto intestinal y muerte
Inmunológico	Respuestas alérgicas con síntomas de dermatitis o asma
Hematológico	Anemia hipocrómica
Ocular	El contacto directo puede provocar congestión de la conjuntiva, secreción, cicatriz corneal y quemaduras
Dermatológico	Irritación, quemaduras, úlceras y reacciones alérgicas
Reproductivo	Disminución en el conteo de esperma, complicaciones durante el embarazo y nacimiento

Fuente: Téllez, Carvajal, & Gaitán (2004), Guertin, Jacobs, & Avakian (2004) y Environmental Protection Agency (2010)

Elaborado por: Bermúdez, 2018

2.2.4 NORMATIVA

La concentración máxima de Cr (VI) en agua de consumo humano recomendada por la Organización Mundial de la Salud es de 0,05 mg/L (OMS) (2008). En el Ecuador, los límites máximos permisibles varían de acuerdo con el tipo de descarga y usos del agua, los cuales están establecidos en el Acuerdo Ministerial N°028 que sustituye al Libro VI Anexo 1 del Texto Unificado De Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA).

Esta norma prohíbe la descarga de aguas residuales, tanto a los cuerpos de agua como al sistema de alcantarillado, si no se cumple con los límites establecidos en la misma o sin no se realiza un tratamiento previo, asimismo, se prohíbe la descarga hacia cuerpos de agua severamente degradados o contaminados (Ministerio del Ambiente, 2015). En el país, la concentración de cromo no debe ser mayor a los límites máximos descritos en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles para el Cr (VI)

Tipo de uso o descarga	Límite máximo permisible (mg de Cr (VI)/L)
Agua de consumo humano	0,05
Uso agrícola	0,10
Uso pecuario	1,00
Descarga al sistema de alcantarillado	0,50
Descarga a un cuerpo de agua dulce	0,50
Descarga a un cuerpo de agua marina	0,50

Fuente: TULSMA Libro VI (2015)

Elaborado por: Bermúdez, 2018

2.3 TÉCNICAS DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE

En la actualidad, se aplican diversas técnicas para la remoción de metales pesados, como precipitación química y electroquímica, filtración por membranas, adsorción, entre otros, a continuación, se hace una breve revisión de los métodos utilizados para remover cromo.

2.3.1. PRECIPITACIÓN QUÍMICA

La precipitación química es el método más frecuentemente utilizado para la remoción de metales pesados en soluciones acuosas, ya que es relativamente fácil de operar, barato y efectivo (Shim et al., 1990). Para este proceso se realiza un ajuste de pH a condiciones básicas, para que en la presencia de un agente precipitante los iones metálicos sean convertidos a su fase sólida insoluble y precipiten, usualmente en forma de hidróxidos metálicos, para posteriormente ser eliminados del efluente (Kurniawan, Chan, Lo, & Babel, 2006).

La principal desventaja de este proceso es que debido a la gran cantidad de lodos que se producen y a la carga de tóxicos, existe un costo adicional para el tratamiento y disposición de los mismos (Ahalya, Ramachandra, & Kanamadi, 2003).

2.3.2. PRECIPITACIÓN ELECTROQUÍMICA

Mediante el uso de electrodos metálicos de hierro o aluminio, se disminuye la concentración de cromo, para lo cual se reduce al cromo de su forma hexavalente a su estado trivalente seguido por la formación de hidróxido de cromo(III) (Barrera, Palomar, Romero, & Martínez, 2003). Una vez formados los hidróxidos metálicos, precipitan debido al incremento en el pH causado por la generación de hidroxilos en la electrólisis, todo esto sucede en un solo proceso sin la necesidad de agregar otros químicos, sin embargo, se los puede agregar

si el medio de la solución es muy ácido para que puedan precipitar (Hu, Zhu, & Liu, 2017).

Las técnicas electroquímicas son una gran alternativa para tratar aguas residuales que contienen tóxicos difíciles de biodegradar o que necesiten de pretratamientos químicos (Owlad, Aroua, Daud, & Baroutian, 2009). Pero debido a su alto costo de implementación (inversión) y operación (alto consumo de energía) no son comúnmente aplicados (Fu & Wang, 2011).

2.3.3. FILTRACIÓN POR MEMBRANAS

Esta técnica es capaz de remover no solo metales pesados como el cromo, sino que también lograr retener en las membranas sólidos suspendidos, compuestos orgánicos y contaminantes inorgánicos (Barakat, 2011). Se utilizan diferentes tipos de membranas para realizar la filtración como inorgánicas, de polímeros o líquidas (Owlad et al., 2009).

Asimismo, dependiendo del tipo de tamaño de las partículas existen diferentes tipos de filtración con membranas como la ultrafiltración (5-20 nm), ósmosis inversa ($10^{-4}\mu m$) y nanofiltración, la cual es utilizada para retener tamaño de partículas entre los valores de las dos primeras (Kurniawan et al., 2006).

No es un método ampliamente usado como consecuencia de su alto costo de implementación y operación, complejidad del proceso y ensuciamiento de la membrana (Fu & Wang, 2011). Además, de tener una alta sensibilidad a los cambios bruscos en la temperaturas (Chávez, 2010).

2.3.4. ADSORCIÓN

La adsorción es un fenómeno de superficie, en el cual un compuesto o contaminante en su fase líquida, sólida o gaseosa, denominando adsorbato, se

adhiera o deposita en la superficie de otro material, usualmente en fase sólida, denominado adsorbente (Gupta & Ali, 2013). El adsorbato es retenido en la superficie del adsorbente, por relativamente débiles fuerzas de Van Der Waals, en pequeños espacios conocidos como sitios activos (Vassilis & Stavros, 2006).

Puesto a que este procedimiento se desarrolla en la superficie del material, el área superficial es un parámetro muy importante en los adsorbentes, por lo que es necesario la utilización de materiales porosos con un área superficial específica en un rango entre 10^2 y 10^3 m²/g, la misma que indica la cantidad de sitios activos disponibles para la retención del adsorbato (Worch, 2012).

Al contrario de las otras técnicas de remoción de cromo, la adsorción es eficiente y de bajo costo, por lo que se han realizado diversos estudios para la remoción de metales pesados usando diferentes materiales como adsorbentes, en su mayoría residuos orgánicos como desechos agroindustriales (Nameni, Moghadam, & Arami, 2008). En la Tabla 2.3 se especifican las eficiencias de remoción de cromo en investigaciones realizadas con desechos industriales.

Tabla 2.3 Eficiencias de remoción de Cr (VI) utilizando desechos agroindustriales

Material	Eficiencia de remoción
Cáscara de coco	83,0%
Aserrín	99,8%
Cáscara de banana	96,0%
Bagazo de caña de azúcar	98,7%
Hojas de té verde	92,0%
Cáscara de maní	98,0%
Semillas de tamarindo	98,0%
Semilla de canola	99,1%

Fuente: Yogeshwaran & Priya (2017)

Elaborado por: Bermúdez, 2018

2.3.4.1. Cinética de Adsorción

La adsorción que ocurre en la superficie del adsorbente se da mediante procesos de difusión y puede ser explicada mediante tres pasos: primero el adsorbato es transportado desde la solución hacia la superficie externa del adsorbente, esto se conoce como difusión externa (Jørgensen, 1979). A continuación, se produce la difusión interna, que consiste en la transferencia del adsorbato desde el exterior del adsorbente hacia su superficie interna, es decir, hacia los sitios internos, para finalmente producirse la adsorción en los sitios activos en la superficie interna (Faust & Osman, 1987).

La cinética de la reacción no es afectada por la adsorción, puesto que es un paso muy rápido y sucede inmediatamente después de la difusión interna, por esa razón su velocidad será controlada por los pasos más lentos, la difusión externa e interna (Karge & Weitkamp, 2008). La adsorción es afectada por el área superficial específica, pH, temperatura, competencia entre adsorbatos y la naturaleza del adsorbato, adsorbente y disolvente (Weber & Borchardt, 1979), a continuación se los detalla en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Factores que influyen en la adsorción

Factor	Efecto
Área superficial específica	A mayor área superficial específica, mejor adsorción
pH	Afecta a la solubilidad del adsorbato
Temperatura	Cambios en la temperatura afectan al proceso
Naturaleza del adsorbato	A mayor afinidad con el disolvente, será menor la adsorción
Naturaleza del adsorbente	Sus características estructurales superficiales determinarán la cantidad de adsorbato retenido
Naturaleza del disolvente	Las características químicas del disolvente determinarán las reacciones que ocurrirán
Competencia entre adsorbatos	La presencia de otro tipo de adsorbatos en la disolución puede generar interferencias en la adsorción

Fuente: Weber & Borchardt (1979)

Realizado por: Bermúdez, 2018

2.3.4.2. Equilibrio de Adsorción

La adsorción llega a un equilibrio dinámico cuando ya no es posible continuar con la acumulación del adsorbato en la superficie del adsorbente, se expresa como la relación entre la cantidad de soluto adsorbido por masa de adsorbente (capacidad de adsorción) y la concentración de soluto en la solución (Bhattacharya, Mandal, & Das, 2006), se puede calcular la capacidad de adsorción usando la ecuación 2.1.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad 2.1$$

Donde:

q_e : capacidad de adsorción (mg/g)

C_o : Concentración inicial del adsorbato (g/L)

C_e : Concentración final del adsorbato en equilibrio (g/L)

V : volumen de la solución (L)

m : masa de adsorbente (g)

El porcentaje de remoción del material se calcula usando la ecuación 2.2.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100 \quad 2.2$$

Donde:

C_o : Concentración inicial del material contaminante (mg/L)

C_f : Concentración final del material contaminante (mg/L)

Las isotermas de adsorción son las representaciones gráficas de este equilibrio, siendo las más usadas las de Langmuir y Freundlich (Igwe, 2007). Por esta razón son fundamentales para describir la relación entre el adsorbato y el adsorbente en el proceso (Desta, 2013).

2.3.4.3. Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir asume que la adsorción se realiza en una monocapa que cubre la superficie del adsorbente, la cual contiene un número finito de espacios donde ocurrirá el fenómeno, estos sitios pueden ser ocupados solo por una molécula de adsorbato y una vez que la superficie ha sido saturada se considera que se ha alcanzado la capacidad máxima de adsorción (Igwe, 2007).

La isoterma de Langmuir se expresa mediante la ecuación 2.3.

$$q_e = \frac{q_{max} \times b \times C_e}{1 + b \times C_e} \quad 2.3$$

Donde:

q_e : cantidad de material adsorbido en equilibrio por unidad de masa de adsorbente (mg/g)

q_{max} : cantidad máxima de adsorción que ocurre en la monocapa (mg/g)

b : constante de afinidad de adsorción entre el adsorbato y el adsorbente (L/mg)

C_e : concentración en equilibrio de los iones metálicos en solución (mg/L)

Se determina los parámetros q_{max} y b , utilizando la pendiente e intercepción de la gráfica $1/q_e$ vs $1/C_e$, misma que puede ser realizada con la forma linealizada de la ecuación 2.2 y corresponde a la ecuación 2.4 (Igwe, 2007).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max} \times b} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad 2.4$$

2.3.4.4. Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico que representa la cantidad de material adsorbido por cantidad de adsorbente en el equilibrio, es decir que es utilizada para estimar la intensidad de adsorción del adsorbente hacia el

adsorbato y al contrario de la isoterma de Langmuir no considera la saturación como la cobertura superficial con una monocapa (Rahman, Adil, Yusof, Kamaruzzaman, & Ansary, 2014). La isoterma de Freundlich esta expresada en la ecuación 2.5.

$$q_e = k_F * C_e^{1/n} \quad 2.5$$

Donde:

q_e : cantidad de material adsorbido en equilibrio por unidad de masa de adsorbente (mg/g)

k_F : constante de la capacidad de adsorción (L/mg)

C_e : concentración en equilibrio de los iones metálicos en solución (mg/L)

n : constante de la intensidad de adsorción

Se determina los parámetros k y n mediante la pendiente e intersección de la gráfica de $\log q_e$ vs $\log C_e$, para la cual se utiliza la forma logarítmica lineal simplificada de la ecuación 2.5, expresada en la ecuación 2.6.

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad 2.6$$

Si el valor de la constante n es menor que 1 se considera que la adsorción es desfavorable, cuando es igual a 1, es una adsorción lineal y si es mayor a uno, se tiene una adsorción favorable (International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering, 2014).

2.4 LA SEMILLA DE LA MORA

La mora es cultivada en un clima templado, razón por la cual las principales plantaciones del Ecuador se encuentran ubicadas en los valles de la región Sierra, especialmente en las provincias de Bolívar, Chimborazo, Cotopaxi, Imbabura, Pichincha y Tungurahua (Calero, 2010). La Organización de la

Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estimó que para el año 2007, el país producía alrededor de 6000 toneladas por año, considerando al Ecuador como uno de los grandes productores mundiales (Cuenca, 2017).

Estudios recientes reportaron que se puede llegar a tener hasta un 26% de desechos generados por el procesamiento de la mora (Mora, 2015). De igual modo, el INEC ha estimado que existen pérdidas en el país de hasta 143 hectáreas por año (Cárdenas, 2013). No obstante, como consecuencia del desconocimiento del valor de estos desechos, no existe un aprovechamiento de éstos, siendo colocados en vertederos o rellenos generando más contaminación (Peñañiel, Brito, Muñoz, Zabala, & Chafra, 2015).

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla la metodología que se siguió para la caracterización del material adsorbente y el diseño de las pruebas experimentales.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ADSORBENTE

Para la caracterización de la semilla de mora se consideraron los parámetros detallados en la Tabla 3.1, los cuales fueron determinados mediante los ensayos establecidos por las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), los cuales se encuentran descritos en el Anexo I.

Tabla 3.1 Métodos y equipos utilizados en la caracterización de la semilla de mora

Parámetro	Unidad	Método	Instrumento	Precisión
Humedad	%	ASTM D4442-16	Balanza analítica Marca: Adam Nimbus	0,0001 g
			Estufa Marca: Lindberg/ Blue	-
Lignina	%	ASTM D1106-96	Balanza analítica Marca: Adam Nimbus	0,0001 g
			Estufa Marca: Lindberg/ Blue	-
Holocelulosa	%	ASTM D1104-56	Balanza analítica Marca: Adam Nimbus	0,0001 g
			Estufa Marca: Lindberg/ Blue	-
Celulosa	%	ASTM D1103-60	Balanza analítica Marca: Adam Nimbus	0,0001 g
			Estufa Marca: Lindberg/ Blue	-
Hemicelulosa	%	ASTM D1109-84	Balanza analítica Marca: Adam Nimbus	0,0001 g
			Estufa Marca: Lindberg/ Blue	-

Elaborado por: Bermúdez, 2018

3.2 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA SEMILLA DE LA MORA

La semilla de mora utilizada en esta investigación fue suministrada por una fábrica de pulpa de frutas, localizada en el sector norte de la ciudad de Quito.

3.2.1 SECADO Y TRITURADO

Debido a que la semilla todavía contaba con pulpa se realizó un lavado previo con agua potable, para remover en su totalidad la fruta y posteriormente se dejó secar naturalmente. A continuación, se realizó el siguiente acondicionamiento del material:

- 1) Se lavó la semilla de mora con agua destilada para remover impurezas.
- 2) Se secó el material en la estufa durante 12 horas, a una temperatura de 105°C.
- 3) Se trituró el material seco con un molino casero.
- 4) Se tamizó y clasificó el material con tamices, Norma ASTM E 11/95 N°40, 50 y 70, para la obtención de tamaños de partículas 425, 300 y 212 μm , respectivamente.
- 5) Se almacenó el material en envases herméticos.

Para finalizar, antes de la realización de los diferentes ensayos se secó el material durante un período de 12 horas a 105°C.

3.2.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SATURACIÓN DE LA SEMILLA DE LA MORA

La determinación del tiempo de saturación de la semilla de la mora se llevó a cabo mediante experimentos de adsorción en batch usando el equipo de prueba de jarras.

Para comenzar, a un litro de la solución madre de Cr (VI), se agregó 10 gramos de semilla de mora a una temperatura de 17°C, con una velocidad de agitación constante de 150 rpm. Se utilizó un tamaño de partícula de 425 μm , ya que como se puede observar, según las tablas presentadas en el Anexo IV, con este tamaño se obtuvo una eficiencia de remoción mayor.

Posteriormente, se realizaron mediciones de Cr (VI) en el efluente durante 180 minutos en intervalos de 20 minutos, a continuación, con los datos detallados en la Tabla 2A en el Anexo II, se graficó la curva de la concentración de Cr (VI) en función del tiempo y finalmente de ésta, se obtiene el tiempo de saturación.

3.2.3 OBTENCIÓN DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN

Una vez determinado el tiempo de equilibrio de la semilla de mora, se procede a la obtención de las isotermas. En primer lugar, se prepararon 6 litros de solución madre, a las cuales se agregó concentraciones iniciales de 1, 3, 5, 7, 9 y 10 gramos de adsorbente por litro. A continuación, se efectuaron las pruebas de jarras a temperatura constante de 17°C en este ensayo, no se realizaron cambios en los valores de pH y concentración inicial de Cr (VI). Transcurrido el tiempo de equilibrio, se realizó las mediciones de concentración de Cr (VI) por método colorimétrico mediante el uso de un espectrofotómetro marca Hach.

Para finalizar, con los datos registrados en la Tabla 2B en el Anexo II y las ecuaciones 2.4 y 2.6, se calcularon los parámetros necesarios para la construcción de las isotermas de Langmuir y Freundlich.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LA SEMILLA DE MORA

Para determinar la capacidad de adsorción de la semilla de mora se realizaron pruebas en sistema discontinuo, tipo batch, se midieron las concentraciones de

Cr (VI) mediante el método espectrofotométrico 8023, con un espectrofotómetro marca Hach, modelo DR 2800. Además, se utilizó un equipo de pruebas de jarras marca Phipps & Bird para la realización de los ensayos en reactores batch.

3.3.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE CROMO

Para esta investigación, se empleó una solución acuosa de 20 ppm de cromato de potasio (K_2CrO_4), teniendo como resultado una concentración de 5,67 mg/L de Cr (VI), similar a la concentración encontrada en los efluentes de la industria de curtiembre, a esta solución se le denominó solución madre.

3.3.2 PRUEBA 1

La prueba 1 contempla la evaluación experimental del material utilizando agua sintética, para establecer la capacidad de adsorción de Cr (VI) de la semilla de mora, con los 3 diferentes tamaños obtenidos de los procesos de trituración y tamizaje: 212, 300 y 425 μm . Como se mencionó anteriormente, en los experimentos se utilizó un equipo de pruebas de jarras con el que se determinó el tiempo de equilibrio y se obtuvo las isotermas de adsorción. En todos los procesos se mantuvo una agitación constante de 150 rpm.

En esta investigación se consideraron al pH, tiempo de contacto, tamaño de partícula, dosis de adsorbente y concentración inicial de cromo, como variables a estudiar, por lo que se siguió las condiciones detalladas en la Tabla 3.2, para cada prueba experimental. El rango de temperatura varió entre 15 y 17°C, sin presentarse cambios significativos en el proceso. En las tablas registradas en el Anexo VI, se detallan los datos obtenidos de cada prueba experimental.

3.3.3 PRUEBA 2

Una vez determinadas las condiciones óptimas de tiempo de contacto y dosis de adsorbente, para la adsorción utilizando la semilla de mora, se procedió a realizar ensayos usando muestras de aguas residuales de curtiembres, ubicadas en la ciudad de Picaihua.

Tabla 3.2 Condiciones experimentales aplicadas en el estudio

Variable	Valores	Unidad	Condiciones
Tiempo de contacto	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180	minutos	Tamaño de partícula: 425 μm Dosis de adsorbente: 10 g/L
Tamaño de partícula	212, 300, 425	μm	Dosis de adsorbente: 10 g/L Tiempo de contacto: 120 minutos
Dosis de adsorbente	1, 3, 5, 9, 10	g/L	Tamaño de partícula: 425 μm Tiempo de contacto: 120 minutos
pH	2, 3, 4	-	Tamaño de partícula: 425 μm Tiempo de contacto: 120 minutos Dosis de adsorbente: 10 g/L
Concentración inicial de Cr (VI)	50	mg/l	Tamaño de partícula: 425 μm Tiempo de contacto: 120 minutos Dosis de adsorbente: 30 g/L

Elaborado por: Bermúdez, 2018

CAPITULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos tanto en la caracterización de la semilla de mora como en la realización de las pruebas de adsorción y construcción de los modelos de adsorción.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE MORA

4.1.1 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS

4.1.1.1. Contenido de humedad, lignina, holocelulosa, celulosa y hemicelulosa

En la Tabla 4.1, se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica de la semilla de la mora, para la cual se utilizó un tamaño de partícula de 425 μm , debido a se obtuvo una mayor eficiencia de remoción con este tamaño. El contenido de humedad promedio de la semilla de mora fue de 2,24%, lo cual indica que es un material con baja capacidad de retención de agua.

Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de mora

Característica	Porcentaje (%)
Humedad	2,24
Lignina	28,83
Holocelulosa	44,81
Celulosa	43,71
Hemicelulosa	32,31

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Se obtuvo un contenido promedio de lignina de 28,83% en la semilla de mora, por lo que se la puede clasificar a la semilla de mora como madera normal blanda

(Sjöström, 1993). Dado que es un polímero natural, es considerada como el principal agente de unión para los componentes fibrosos de las plantas (Wu, Zhang, Guo, & Huang, 2008). La adsorción de metales pesados es favorable por la presencia de grupo funcionales como hidroxilos y carboxilos, en la estructura de la lignina (Guo, Zhang, & Shan, 2008).

Generalmente, en maderas duras se encuentra un contenido elevado de holocelulosa, entre el 70 y 90% (Lima, 2013). Para la semilla de mora se determinó un contenido promedio de holocelulosa de 44,81%, por lo que se considera una madera blanda.

El contenido promedio de celulosa de la semilla de mora es 43,71%. La celulosa ya ha sido ampliamente usada como adsorbente de metales ya que cuenta con la presencia de grupos hidroximetilos e hidroxilos en sus moléculas facilitando la adsorción de compuestos (Luo, Zeng, Liu, & Zhang, 2015).

El contenido promedio de hemicelulosa de la semilla de mora es de 32,31%, es considerada más reactiva que la celulosa ya que cuenta con grupos carboxílicos ionizables provenientes de polímeros carbohidratados, mismos que reaccionan con iones metálicos, por lo que su presencia indica una alta eficiencia de remoción de metales pesados (Isaacson, 1991). En las tablas registradas en el Anexo IV, se detallan los valores obtenidos en las pruebas de caracterización.

4.1.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

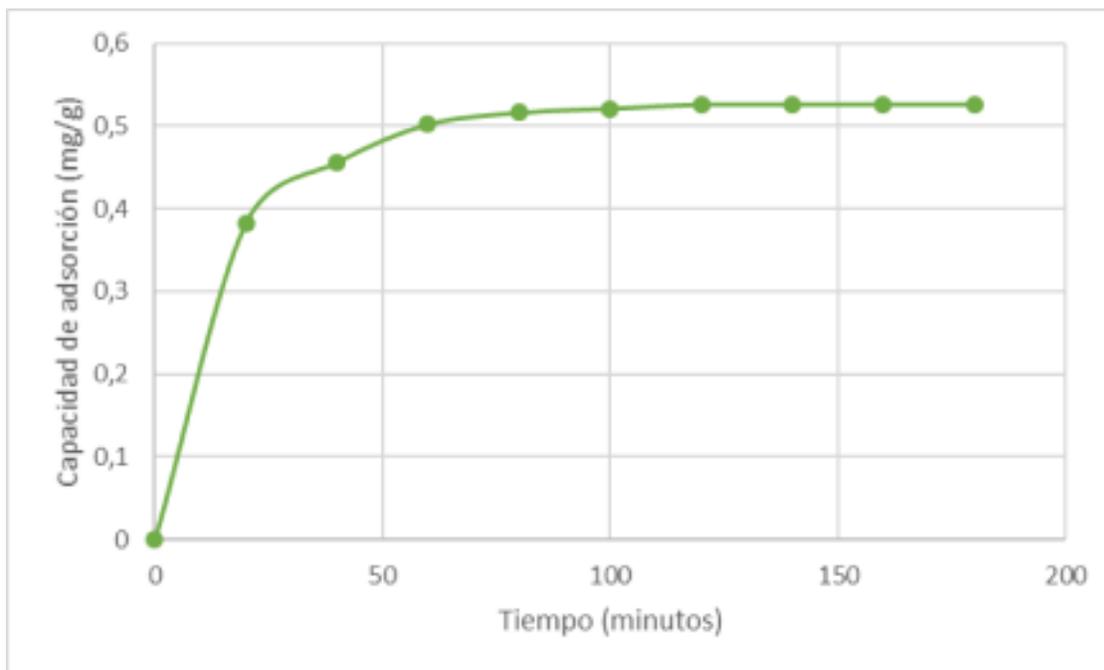
4.1.1.1. Tiempo de equilibrio

En la Tabla 2A en el Anexo II, se muestran los datos experimentales obtenidos de la adsorción para un 1 litro de solución acuosa de Cr (VI) de 5,67 mg/L, a una temperatura de 17°C, agitación de 150 rpm, utilizando a la semilla de mora como adsorbente con una dosis de 10 gramos y un tamaño de partícula de 425 µm. Se

determinó que el tiempo de equilibrio es de 120 minutos, con una eficiencia de remoción de Cr (VI) de 92,77%.

La Figura 4.1 corresponde a la representación gráfica del tiempo de equilibrio de la semilla de mora en función de la capacidad de adsorción del material. Se puede observar como a los 120 minutos se alcanza el tiempo de equilibrio; y hasta los 180 minutos de experimentación no evidencia desorción según las concentraciones medidas. Por lo que se determina que la capacidad máxima de adsorción para un tiempo de equilibrio de 120 minutos es de aproximadamente 0,53 mg de Cr (VI) por cada gramo de semilla de mora.

Figura 4.1 Tiempo de equilibrio en función de la capacidad de adsorción de la semilla de mora como adsorbente de Cr (VI) en solución



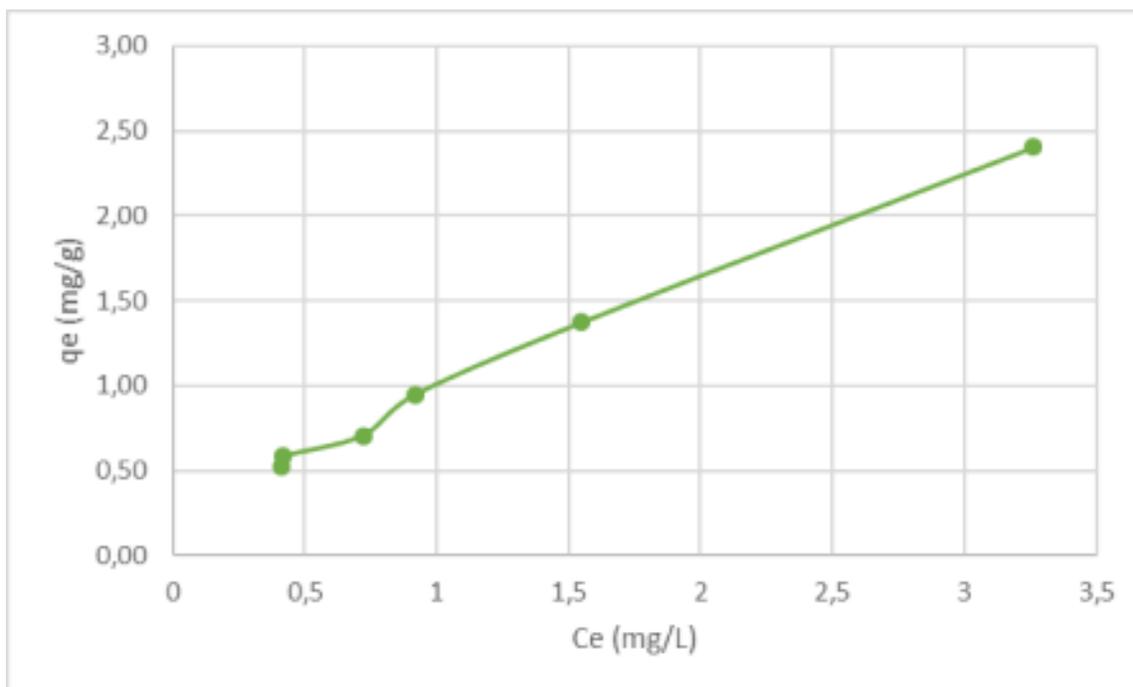
Elaborado por: Bermúdez, 2018

4.1.1.2. Datos de equilibrio

En la Figura 4.2, se puede observar los datos de equilibrio de la semilla de mora como adsorbente en la remoción de Cr (VI), bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de cromo de 5,67 mg/L, tamaño de partícula de 425 μm , velocidad de agitación de 150 rpm, además, se utilizó el tiempo de equilibrio determinado previamente de 120 minutos y una variación de dosis de adsorbente en un intervalo de 1 a 10 gramos.

Como se puede apreciar en la Figura 4.2, la curva tiene una tendencia ascendente por lo que se asume que la adsorción de Cr (VI) se ve favorecida con una mayor cantidad de adsorbente. A partir de los datos de equilibrio obtenidos se construirán las isotermas de Langmuir y Freundlich.

Figura 4.2 Datos de equilibrio de la semilla de mora como adsorbente en la remoción de Cr (VI)



Elaborado por: Bermúdez, 2018

4.1.1.3. Isoterma de Langmuir

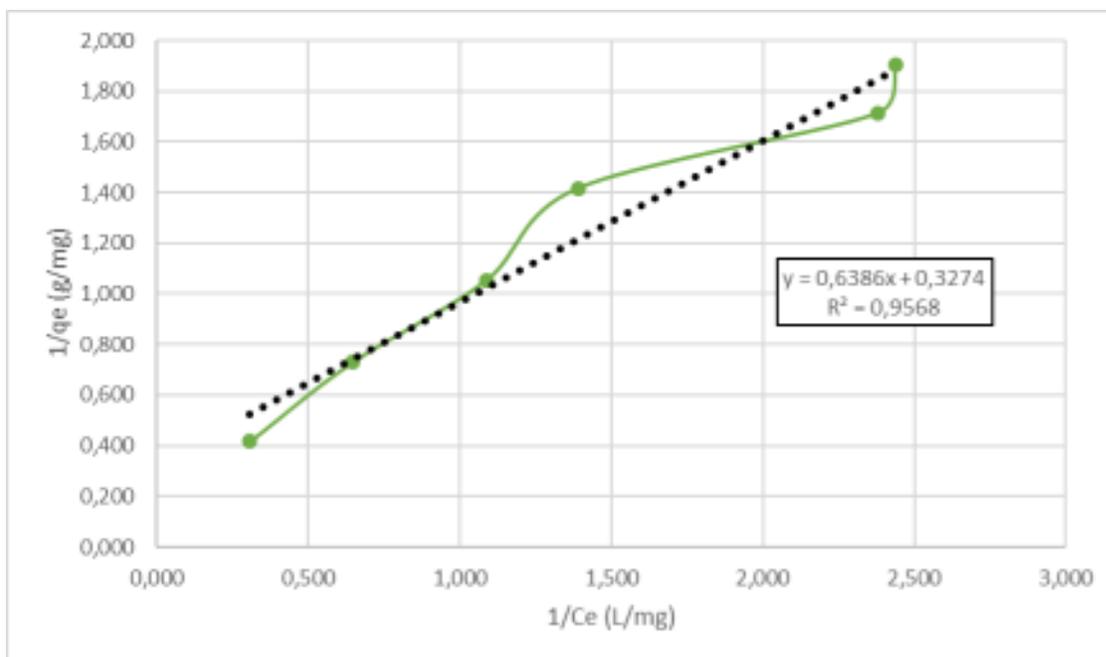
Mediante la utilización de los datos de equilibrio, se procedió a graficar la forma linealizada de la isoterma de Langmuir como se muestra en la Figura 4.3, para posteriormente realizar el cálculo de sus constantes, mismas que se detallan en la Tabla 4.2. Para la isoterma de Langmuir, se tiene una correlación lineal de 0,9568, lo que quiere decir que se tiene una adsorción favorable.

Tabla 4.2 Parámetros calculados de la isoterma de Langmuir

q_{max} (mg/g)	b (L/mg)	R^2
1,566	1,95	0,9568

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 4.3 Forma linealizada de la isoterma de Langmuir para la remoción de Cr (VI) mediante la utilización de semilla de mora como adsorbente



Elaborado por: Bermúdez, 2018

4.1.1.4. Isoterma de Freundlich

De igual forma, con el uso de los datos de equilibrio se graficó la forma linealizada de la isoterma de Freundlich como se muestra en la Figura 4.4, a continuación, se determinó sus constantes, detalladas en la Tabla 4.3.

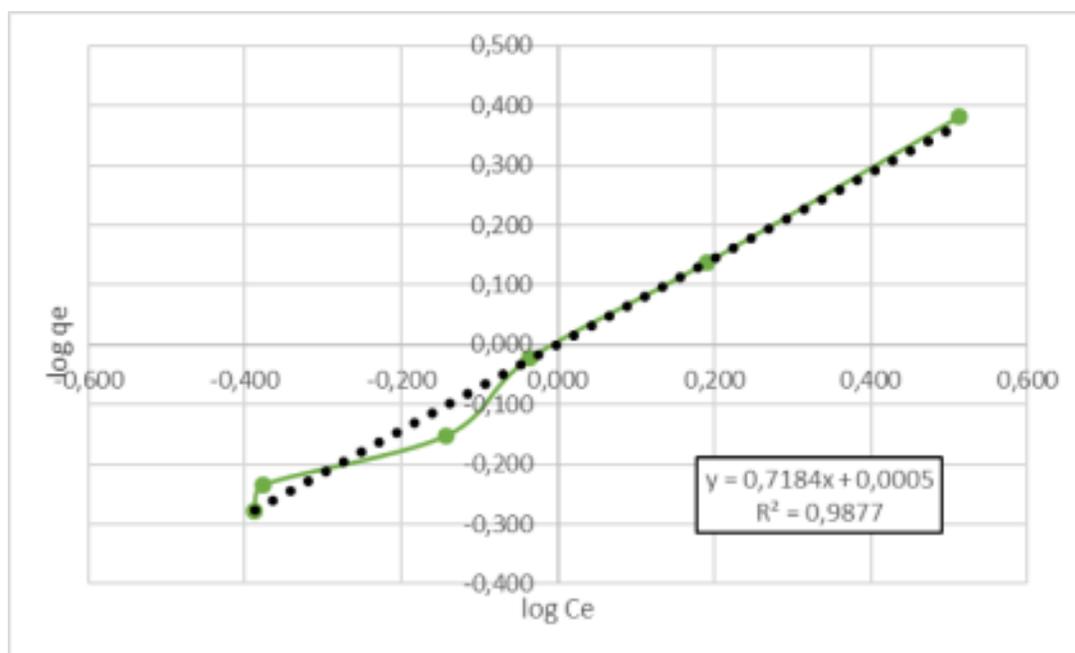
Tabla 4.3 Parámetros calculados de la isoterma de Freundlich

k_F (L/mg)	n	R^2
1,001	1,399	0,9877

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Para la isoterma de Freundlich, se tiene una correlación lineal de 0,9877. El valor de la constante n es igual a 1,399 y al ser mayor a 1, lo cual indica que la adsorción es favorable.

Figura 4.4 Forma linealizada de la isoterma de Freundlich para la remoción de Cr (VI) mediante la utilización de semilla de mora como adsorbente



Elaborado por: Bermúdez, 2018

La Tabla 4.2 muestra que el coeficiente de correlación de la forma linealizada de la isoterma de Langmuir es de 0,9568, mientras que la Tabla 4.3 indica que el coeficiente de correlación de la forma linealizada de la isoterma de Freundlich es de 0,9877. Lo que permite concluir que la adsorción de Cr (VI) usando semilla de mora se ajusta mejor al modelo isotérmico de Freundlich. Es decir, que se tiene una distribución heterogénea de los sitios activos en la superficie.

4.2 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CROMO

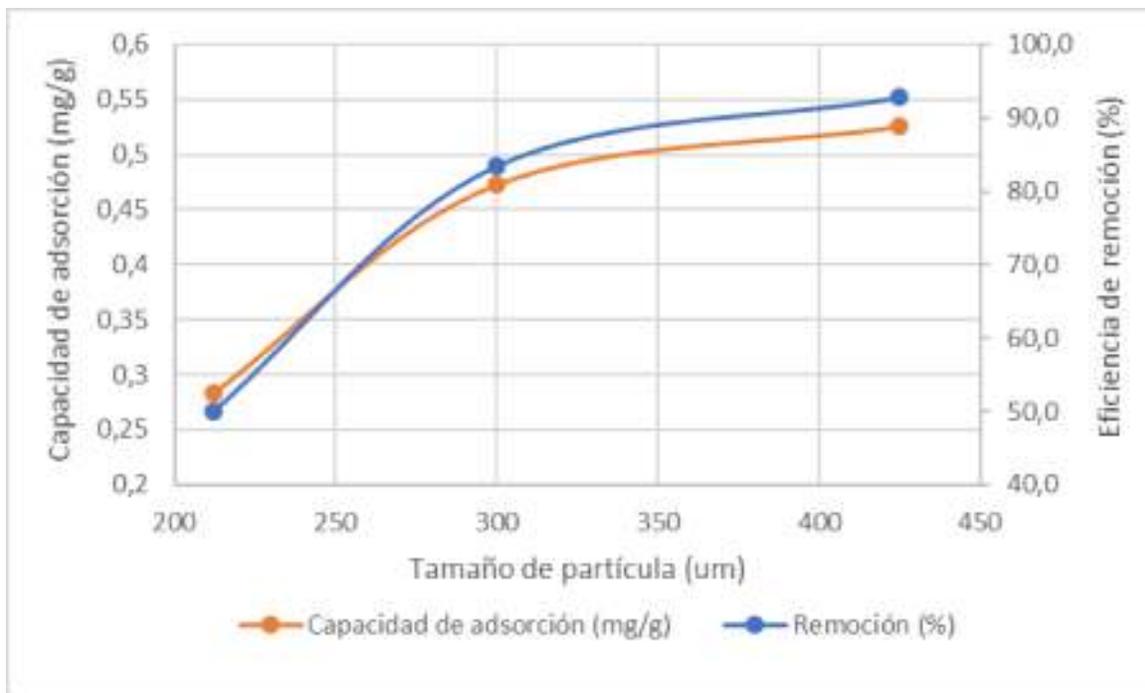
4.2.1. ANÁLISIS DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN PARA CADA VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES

4.2.1.1. Tamaño de partícula

En la **Figura 4.5**, se puede observar la influencia del tamaño de partícula en la adsorción de Cr (VI) usando semilla de mora en función de la capacidad de adsorción. Las pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de cromo de 5,67 mg/L, dosis de adsorbente de 10 gramos, tiempo de contacto de 120 minutos, velocidad de agitación de 150 rpm y una variación de tamaño de partícula de 212, 300 y 425 μm .

Se puede observar cómo, de los tres tamaños de partícula analizados, con el mayor de ellos se tiene una mejor adsorción en el proceso, por lo que el tamaño de partícula óptimo determinado fue de 425 μm , con una capacidad de adsorción de 0,53 mg de Cr (VI) por cada gramo de semilla de mora y con una eficiencia de remoción de Cr (VI) del 92,77%, lo cual hace a la semilla de mora un material más eficiente frente a otros residuos usados como bioadsorbentes con similar tamaño de partícula como la cáscara de naranja (Pinzón & Cardona, 2010), cáscara de plátano (Tejeda, Tejeda, Marimón, & Villabona, 2014), y cáscara de tomate de árbol (Arévalo, 2017), con eficiencias de remoción de 61,4%, 88,2% y 34,2%, respectivamente.

Figura 4.5 Influencia del tamaño de partícula en la remoción de Cr (VI) usando semilla de mora en función de la capacidad de adsorción



Elaborado por: Bermúdez, 2018

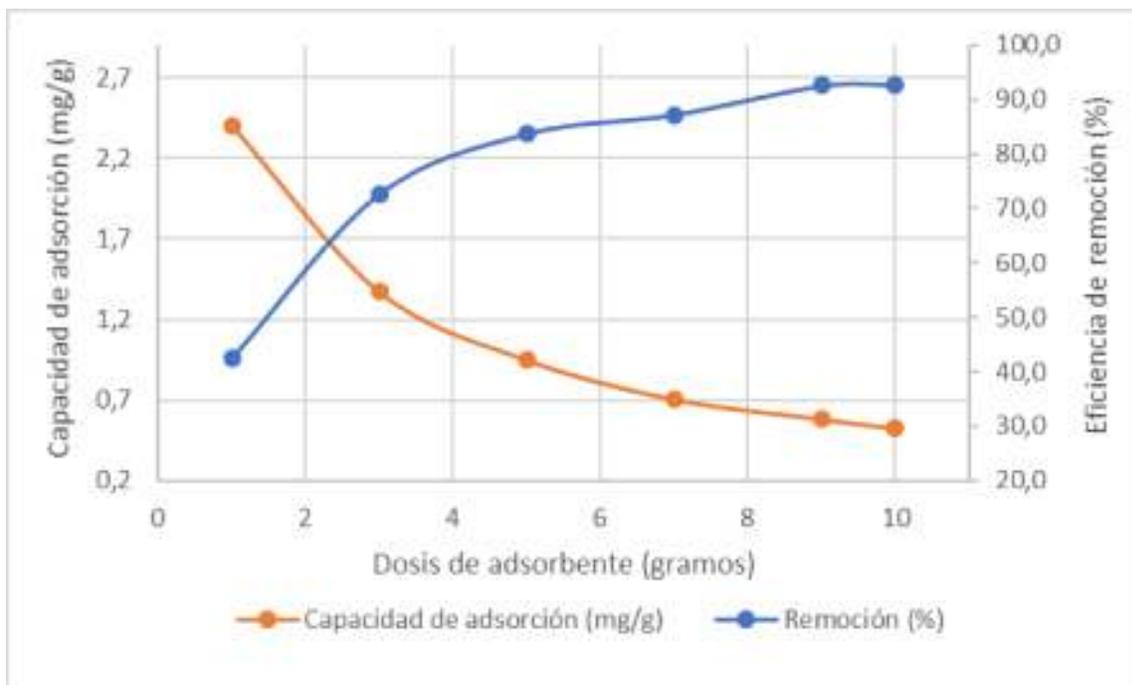
4.2.1.2. Dosis de adsorbente

En la Figura 4.6, se puede observar la influencia de la dosis de adsorbente en la remoción de Cr (VI) usando semilla de mora en función de la capacidad de adsorción. Las pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de cromo de 5,67 mg/L, tamaño de partícula de 425 µm, tiempo de contacto de 120 minutos, velocidad de agitación de 150 rpm y una variación de la dosis de adsorbente de 1, 3, 5, 7, 9 y 10 gramos.

Como se concluyó previamente la adsorción será favorecida con el uso de una dosis mayor de adsorbente, por lo que se determinó que la dosis óptima de adsorbente de Cr (VI) es de 10 gramos, con una eficiencia de remoción de aproximadamente el 93%. Asimismo, en estudios que emplean otro tipo de bioadsorbentes, como la cáscara de arroz (Eggs et al., 2012) y la cáscara seca

del coco (Silva et al., 2014), en donde se obtuvo eficiencias de remoción de 99% y 94,6% respectivamente, se puede observar como al aumentar la dosis de adsorbente, disminuye la concentración del contaminante.

Figura 4.6 Influencia de la dosis de adsorbente en la remoción de Cr (VI) con semilla de mora en función de la capacidad de adsorción



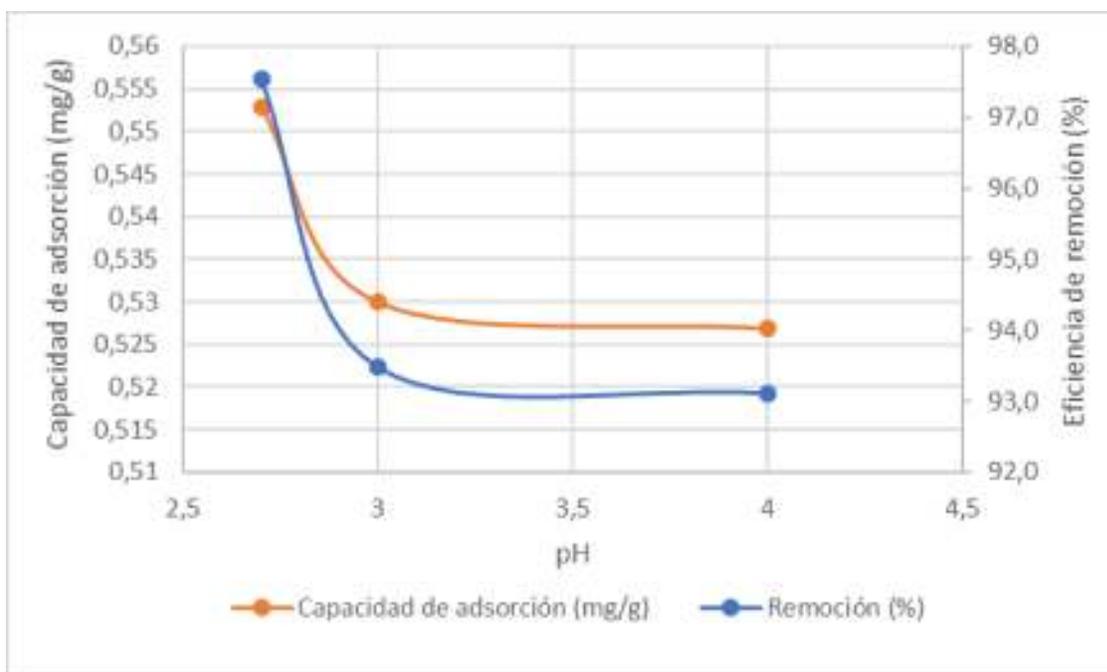
Elaborado por: Bermúdez, 2018

4.2.1.3. pH

En la Figura 4.7, se muestra la influencia del pH en la remoción de Cr (VI) usando semilla de mora en función de la capacidad de adsorción. Las pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de cromo de 5,67 mg/L, tamaño de partícula de 425 μm , tiempo de contacto de 120 minutos, velocidad de agitación de 150 rpm, dosis de adsorbente de 10 gramos y una variación de pH de 2.7, 3 y 4.

Se puede afirmar que en un pH ácido se tiene una mayor adsorción de Cr (VI), siendo el pH óptimo de adsorción 2.7, con una capacidad de remoción de 0,55 mg de cromo de Cr (VI) por cada gramo de semilla de mora y una eficiencia de remoción de 97,53%. Este resultados concuerdan con adsorbentes como la cáscara de yuca (H. Acosta, Barraza, & Albis, 2017) y la corteza del árbol de neem (Bhattacharya et al., 2006), donde se alcanzó los mayores porcentajes de remoción de Cr (VI) en un rango de pH de 2 a 3, con eficiencias de remoción de 40% y 78%, respectivamente.

Figura 4.7 Influencia del pH en la remoción de Cr (VI) con semilla de mora en función de la capacidad de adsorción



Elaborado por: Bermúdez, 2018

4.2.1.4. Concentración inicial de Cr (VI)

En la Tabla 40 en el Anexo IV, se muestran los resultados experimentales obtenidos de la adsorción de Cr (VI) usando semilla de mora para las siguientes condiciones experimentales: concentración inicial de 58,5 mg/L, tamaño de partícula de 425 μ m, tiempo de contacto de 120 minutos, velocidad de agitación

de 150 rpm y pH 2.7. Debido a la alta concentración de cromo en el agua sintética, se decidió usar una concentración de adsorbente de 30 gramos.

En la Tabla 4.4, se puede apreciar como al aumentar la dosis de adsorbente favoreció al proceso de adsorción, obteniéndose una mayor eficiencia de remoción de 99,59%. Asimismo, se puede observar como la concentración final de cromo es de 0,24 mg/L, siendo este valor menor al límite máximo permisible de 0,50 mg/L para descargas a sistemas de alcantarillado y a cuerpos de agua dulce.

Tabla 4.4 Remoción de Cr (VI) usando semilla de mora para una variación de la concentración inicial de cromo

Masa de adsorbente (g)	Concentración inicial de Cr (VI) (mg/L)	Concentración final de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
10,0035	5,67	0,14	0,55	97,53
30,0012	58,50	0,24	1,94	99,59

Elaborado por: Bermúdez, 2018

4.2.2. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN OBTENIDA EN UNA MUESTRA DE CURTIEMBRE

En la Tabla 4.5 se puede observar la eficiencia de remoción del Cr (VI) usando semilla de mora de muestras de agua proveniente de una curtiembre de la ciudad de Picaihua. Las pruebas se realizaron por duplicado bajo las siguientes condiciones: tamaño de partícula de 425 μm , tiempo de contacto de 120 minutos, velocidad de agitación de 150 rpm y dosis de adsorbente de 10 gramos. No se realizó una variación del pH, ya que la muestra presentaba un pH ácido de 3,01.

La concentración final de Cr (VI) en la aplicación práctica se encuentra por debajo del límite máximo permisible para descargas de 0,5 mg/L, con eficiencias de remoción de aproximadamente 96%.

Tabla 4.5 Resultados de remoción de Cr (VI) en muestras de aguas residuales de curtiembre usando semilla de mora como adsorbente

Concentración inicial de cromo (mg/L)	Concentración final de cromo (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
5,89	0,21	0,552	96,43
5,73	0,20	0,553	96,51

Elaborado por: Bermúdez, 2018

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización de la semilla de mora determinó que es un material con una baja capacidad de retención de agua al tener un bajo contenido de humedad de 2,2%, además, se tiene la presencia de lignina (28,83%), celulosa (43,71%) y hemicelulosa (32,31%) en su estructura, siendo que estas características favorecen a la adsorción, por lo que se puede considerar como un material adsorbente.
- La construcción de los modelos isotérmicos indicó que el proceso de adsorción utilizando semilla de mora se ajusta mejor a la isoterma de Freundlich, considerándose que el fenómeno ocurre de forma heterogénea en la superficie, asimismo, se obtuvo un valor de la constante n de 1,399, por lo que se puede afirmar que se tiene una adsorción favorable durante el proceso.
- Las pruebas en sistema discontinuo reportaron una eficiencia máxima de 97,53%, para una dosis de adsorbente óptima de 10 gramos de semilla de mora, tiempo de contacto de 120 minutos, tamaño de partícula de 425 μm , pH de 2,7 y una concentración final de contaminante a 0,14 mg/L, valor que cumple la normativa ambiental.
- A pesar de que se reportó una mayor eficiencia de remoción utilizando una mayor cantidad de adsorbente, no se considera esta como dosis óptima, ya que, utilizando 10 gramos de semilla de mora por litro, se logra reducir la concentración final hasta cumplir el límite máximo permisible de descargas.

- Debido a sus altas eficiencias de remoción, se puede considerar como una técnica alternativa de remoción de cromo a la adsorción usando semilla de mora, siendo este proceso sencillo con un material de bajo costo y no tóxico.

5.2 RECOMENDACIONES

- La semilla de mora es un material poco estudiado que cuenta con una gran capacidad de adsorción, por lo que se recomienda realizar estudios empleando diferentes metales pesados para evaluar su eficiencia de remoción.
- Los efluentes de aguas residuales de la industria curtiembre contienen una gran cantidad de sustancias químicas, se recomienda implementar nuevos parámetros al estudio, para simular condiciones más reales y evaluar su efecto en la capacidad de adsorción del material.
- Para la implementación de esta tecnología, se recomienda diseñar un sistema de gestión para que se facilite la obtención de la semilla de mora.
- Como en todo proceso se genera residuos, se recomienda realizar un estudio para la disposición final de los mismos, para que el contenido de metales pesados no produzca nuevamente efectos nocivos en el ambiente.
- Así como la semilla de mora, existen una gran cantidad de desechos orgánicos que no han sido estudiados, por lo que es recomendable generar nuevos conocimientos realizando estudios con diferentes residuos orgánicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H., Barraza, C., & Albis, A. (2017). Adsorción de cromo (VI) utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) como biosorbente: Estudio cinético. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 58-76. <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8943>
- Acosta, I., López, V., Coronado, E., Cárdenas, J. F., & Martínez, V. M. (2010). Remoción de Cromo (VI) en Solución Acuosa por la Biomasa de la Cáscara de Tamarindo (*Tamarindus indica*). *BioTecnología*, 14(3). Recuperado de http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2010_3/GALERAS_ART_53FINA L.pdf
- Agency for Toxic Substances & Disease Registry. (2018). *Toxicological Profile: Chromium*. Atlanta. Recuperado de <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=62&tid=17>
- Ahalya, N., Ramachandra, T., & Kanamadi, R. D. (2003). Biosorption of Heavy Metals. *Research Journal Of Chemistry And Environment*, 7(4). Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/257029311>
- Alegría, A., & Echeagaray, R. (2017). Control de la contaminación en aguas residuales de curtiembres, mediante fotocatalisis heterogénea con TiO₂. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12884>
- Arellano, J. (2014). *Diseño del tratamiento de aguas residuales para el teñido en la Curtiduría Tungurahua S.A.* <https://doi.org/Escola Superior Politécnica de Chimborazo>
- Arévalo, P. (2017). Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara del tomate de árbol (*Solanum betaceum*). Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14460>
- Asfaw, T., Tadesse, T., & Ewnetie, A. (2017). *Determination of Total Chromium*

- and Chromium Species in Kombolcha Tannery Wastewater, Surrounding Soil, and Lettuce Plant Samples, South Wollo, Ethiopia. Advances in Chemistry, 2017, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2017/6191050>*
- ASTM D1103 - 60(1977) Method of Test for Alpha-Cellulose in Wood (Withdrawn 1985). <https://www.astm.org/Standards/D1103.htm>
- ASTM D1104 - 56(1978) Method of Test for Holocellulose in Wood (Withdrawn 1985). <https://www.astm.org/Standards/D1104.htm>
- ASTM D1106-96 (2013). Standard test methods for acid-Insoluble lignin in wood. <https://www.astm.org/Standard/D1106.htm>
- ASTM D1109 - 84(2013) Standard Test Method for 1 % Sodium Hydroxide Solubility of Wood. <https://www.astm.org/Standards/D1109.htm>
- ASTM D4442-16 (2007). Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. https://comasss.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D4442+16
- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4(4), 361-377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>
- Barrera, C., Palomar, M., Romero, M., & Martínez, S. (2003). Chemical and electrochemical considerations on the removal process of hexavalent chromium from aqueous media. *Journal of Applied Electrochemistry*, 33, 61-71. Recuperado de https://www.academia.edu/21433200/Chemical_and_electrochemical_considerations_on_the_removal_process_of_hexavalent_chromium_from_aqueous_media?auto=download
- Basegio, T., Beck Leão, A., Bernardes, A., & Bergmann, C. (2009). Vitrification: An alternative to minimize environmental impact caused by leather industry wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 604-611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.045>
- Belay, A. (2010). Impacts of Chromium from Tannery Effluent and Evaluation of

- Alternative Treatment Options. Journal of Environmental Protection*, 1, 53-58. <https://doi.org/10.4236/jep.2010.11007>
- Bhattacharya, A., Mandal, N., & Das, S. K. (2006). Removal of Cr(VI) from aqueous solution by adsorption onto low cost non-conventional adsorbents. *Indian Journal of Chemical Technology*, 13, 576-583. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/cc33/df3916df82abc0a8cf95b83a4f9ab199627a.pdf>
- Cabeza, L., Taylor, M., Dimaio, G., Brown, E., Marmer, W., Carrio, R., ... Cot, J. (1998). Processing of leather waste: pilot scale studies on chrome shavings. Isolation of potentially valuable protein products and chromium. Recuperado de <https://eurekamag.com/pdf/011/011201989.pdf>
- Calero, V. (2010). Estudio de prefactibilidad para la producción de mora (*Rubus lanciniatus*) variedad brazos, en Atuntaquí-Imbabura. Recuperado de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/952>
- Cárdenas, Y. (2013). Evaluación agronómica y fenología de dos clones de mora sin espinas (*Rubus glaucus* Benth) para determinar su potencial comercial. Tumbaco, Ecuador. Quito: UCE. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1005>
- Chávez, Á. (2010). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* (Vol. 9). Recuperado de <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/6>
- Corredor, J. (2006). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 16, 14-28. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91116203>
- Cuenca, P. (2017). Evaluación de las características físico químicas del colorante de la mora, extraído con microondas a diferentes niveles de tiempo y potencia. Universidad Central del Ecuador. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/9205/1/T-UCE-0004-10.pdf>
- Desta, M. B. (2013). *Batch Sorption Experiments: Langmuir and Freundlich*

- Isotherm Studies for the Adsorption of Textile Metal Ions onto Teff Straw (Eragrostis tef) Agricultural Waste. Journal of Thermodynamics, 2013, 1-6.*
<https://doi.org/10.1155/2013/375830>
- Eggs, N., Salvarezza, S., Azario, R., Fernández, N., & García, M. (2012). *Adsorción de cromo hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente. Recuperado 22 de noviembre de 2019, de*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4052687>
- Environmental Protection Agency. (2010). *IRIS Toxicological Review of Hexavalent Chromium (2010 External Review Draft). Washington DC.*
Recuperado de https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/recordisplay.cfm?deid=221433
- Faust, S., & Osman, Al. (1987). *Adsorption processes for water treatment. Stoneham: Butterworth Publishers.*
- Fernández, E., & Verduga, L. (2014). *Evaluación de la eficiencia de biorremediación de efluentes de curtiembres en tanques sedimentadores artesanales del proceso de pelambre mediante el aislamiento de bacterias remediadoras; estudio de caso: taller artesanal en barrio Totoras, cantón Ambato. Recuperado de* <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/7693>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). *Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. Journal of Environmental Management, 92(3), 407-418.*
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2010.11.011>
- Gordillo, E., & Toledo, E. (2013). *Técnicas ambientales de producción más limpia en la industria de curtiembre. Universidad Central del Ecuador. Recuperado de* <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1371/1/T-UCE-0012-249.pdf>
- Grefa, G. (2012). *Sistema de Producción más Limpia para el Manejo de efluente en el laboratorio de Pruebas Físicas de cuero de la Asociación Nacional de Curtidores del Ecuador-Ance. Recuperado de*
http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/2329/1/Tesis_t686id.pdf

- Guertin, J., Jacobs, J., & Avakian, C. (2004). *Chromium (VI) handbook* (1st ed.). CRC Press.
- Guo, X., Zhang, S., & Shan, X.-Q. (2008). Adsorption of metal ions on lignin. *Journal of Hazardous Materials*, 151, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.065>
- Gupta, V. K., & Ali, I. (2013). *Water Treatment for Inorganic Pollutants by Adsorption Technology*. En *Environmental Water* (pp. 29-91). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59399-3.00002-7>
- Hidalgo, J. (2015). *Diseño de una planta de tratamiento primario para las aguas residuales de una curtiembre con base en la flotación con aire inducido (IAF) en un clarificador de platos inclinados*. Quito, 2015. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11363>
- Hu, Y., Zhu, J., & Liu, Y. (2017). Removal of chromium(VI) from aqueous solutions by electrochemical reduction-precipitation. *International Journal of Electrochemical Science*, 12, 11387-11396. <https://doi.org/10.20964/2017.12.12>
- Igwe, J. (2007). *A Review of Potentially Low Cost Sorbents for Heavy Metal Removal and Recovery*. *Terrestrial and Aquatic Environmental Toxicology*, 1(2), 60-69. Recuperado de [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0712/TAET_1\(1&2\)/TAET_1\(2\)60-69o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0712/TAET_1(1&2)/TAET_1(2)60-69o.pdf)
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2012). *Análisis sectorial*. Recuperado de <http://www.inec.gob.ec/cenec/index>.
- International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering*. (2014). *Environment, energy and sustainable development*. (W. Sung, J. Kao, & Ra. Chen, Eds.).
- Isaacson, R. (1991). *Methane from Community Wastes*. Chicago: Taylor and Francis.

- Jørgensen, S. (1979). *Industrial waste water management*. Elsevier Scientific Pub. Co.
- Karge, H., & Weitkamp, J. (2008). *Adsorption and diffusion*. Springer.
- Khan, N., Shah, ZahirAdnan, M., Saeed, M., Fahad, S., Ali, M., Zahoor, M., ... Khan, W. A. (2016). Assessment of Plants for Chromium Concentration in the Basin of Chromite Hills in Lower Malakand-Pakistan. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 16(6), 1172-1175. <https://doi.org/10.5829/idosi.aej.2016.16.6.12967>
- Kimbrough, D. E., Cohen, Y., Winer, A. M., Creelman, L., & Mabuni, C. (1999). A Critical Assessment of Chromium in the Environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1), 1-46. <https://doi.org/10.1080/10643389991259164>
- Kurniawan, T. A., Chan, G. Y. S., Lo, W.-H., & Babel, S. (2006). Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118, 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015>
- Kwikima, M., & Lema, M. (2017). Sorption Characteristics of Hexavalent Chromium in the Soil Based on Batch Experiment and Their Implications to the Environment. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5, 152-164. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.53011>
- Lima, L. (2013). *Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía* .
- Louhab, K., Sahmoune, N., Addad, J., & Barr, S. (2008). Quality improvement of recycled chromium in the tanning operation by fermentation waste. *En Twelfth International Water Technology Conference (Vol. 12)*. Recuperado de <http://iwtc.info/wp-content/uploads/2010/09/QUALITY-IMPROVEMENT-OF-RECYCLED-CHROMIUM-IN-THE-TANNING-OPERATION-BY-FERMENTATION-WASTE.pdf>
- Luo, X., Zeng, J., Liu, S., & Zhang, L. (2015). An effective and recyclable adsorbent for the removal of heavy metal ions from aqueous system:

Magnetic chitosan/cellulose microspheres. Bioresource Technology, 194, 403-406. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.044>

Medina, P. (2016). Determinación de cromo hexavalente en descargas de aguas residuales de una curtiembre, ubicada en el sector de Izamba, Ambato en la provincia de Tungurahua, mediante espectrofotometría de absorción atómica. InfoANALÍTICA, (1). Recuperado de <http://infoanalitica-puce.edu.ec/index.php/infoanalitica/article/view/44>

Melnick, E., & Everitt, B. (2008). Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment. John Wiley & Sons.

Ministerio de Industrias y Productividad. (2011a). Boletín mensual de análisis sectorial de MIPYMES - Ropa de vestir de cuero para exportación. Quito. Recuperado de <https://www.flacso.edu.ec/portal/pnTemp/PageMaster/dvwqb97pv9quz2d9pwwqomo3wnqad7.pdf>

Ministerio de Industrias y Productividad. (2011b). Boletín mensual de análisis sectorial de MIPYMES - Zapatos de cuero de vestir para exportación. Recuperado de <https://www.flacso.edu.ec/portal/pnTemp/PageMaster/wgksn2ckftv2mex9rh3s2uijscz1z8.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial No. 028 Sustitúyese el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155123.pdf>

Molina, J. (2014). La planta de tratamiento de aguas residuales de la Curtiduría Tungurahua y la Normativa Legal para el Manejo Integral de Desechos Líquidos provenientes de Curtiembres. Universidad Técnica de Ambato. Recuperado de <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8515/1/FJCS-DE-740.pdf>

Mora, V. (2015). Evaluación de dos hongos filamentosos para la biosíntesis de celulasas a partir de residuos agroindustriales de mora (Rubus

- adenotrichos) mediate fermentation in solid medium. Universidad de Costa Rica. Recuperado de <http://www.biologia.ucr.ac.cr/TesisLic/VannyMoraVillalobos.pdf>
- Nameni, M., Moghadam, M. R. A., & Arami, M. (2008). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by wheat bran. *International Journal of Environmental Science*, 5(2), 161-168. Recuperado de <http://www.bioline.org.br/pdf?st08019>
- Ndlovu, S., Simate, G., & Matinde, E. (2017). *Waste production and utilization in the metal extraction industry.* (Taylor & Francis Group, Ed.). Boca Ratón: CRC Press.
- Niculescu, M., Ionitță, A., & Filipescu, L. (2010). Removal chromium pollution from leather industries wastes. *University Politehnica of Bucharest*, 72(3). Recuperado de https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full7786.pdf
- Oliveira, H. (2012). Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity. *Journal of Botany*, 2012, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2012/375843>
- Organización Mundial de la Salud. (2008). *Chromium in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.* Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/chromium.pdf
- Otiniano, M., Tuesta, L., Robles, H., Luján, M., & Chavez, M. (2007). Biorremediación de cromo VI de aguas residuales de curtiembre por *Pseudomonas sp* y su efecto sobre el ciclo celular de *Allium cepa*, 32-42. Recuperado de <http://200.62.146.19/BVRevistas/rmv/v04n1/pdf/a04v4n1.pdf>
- Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W., & Baroutian, S. (2009). Removal of Hexavalent Chromium-Contaminated Water and Wastewater: A Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 200(1-4), 59-77.

<https://doi.org/10.1007/s11270-008-9893-7>

- Ozdemir, C., Karatas, M., Dursun, S., Argun, M., & Dogan, S. (2005). *Effect of Mnso 4 on the Chromium Removal from the Leather Industry Wastewater. Environmental Technology*, 26(4), 397-400.
<https://doi.org/10.1080/09593332608618551>
- Paredes, L. (2015). *Biocoagulación: tratamiento de aguas residuales de la industria de la curtiembre. Universidad de las Américas. Recuperado de <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/2504>*
- Peñafiel, S., Brito, G., Muñoz, G., Zabala, A., & Chafra, A. (2015). *UTILIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE PROTEÍNA MICROBIANA. European Scientific Journal*, 11(27), 1857-7881.
Recuperado de <http://eujournal.org/index.php/esj/article/viewFile/6270/6042>
- Pinzón, M., & Cardona, A. (2010). *Influencia del pH en la bioadsorción de Cr(III) sobre cáscara de naranja: Determinación de las condiciones de operación en proceso discontinuo. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(1). Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/903/90315226003/>
- Portilla, A. (2013). *Análisis Técnico Ambiental del Proceso de la Curtiduría Serrano de la ciudad Ambato y Diseño de la Planta de Tratamiento de las Aguas Residuales. Universidad Central del Ecuador. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1564/1/T-UCE-0012-261.pdf>*
- Proctor, D. (1997). *Chromium in soil: perspectives in chemistry, health and environmental regulation. CRC Press/Lewis Publishers.*
- Rahman, M., Adil, M., Yusof, A., Kamaruzzaman, Y., & Ansary, R. (2014). *Removal of Heavy Metal Ions with Acid Activated Carbons Derived from Oil Palm and Coconut Shells. Materials*, 7(5), 3634-3650.
<https://doi.org/10.3390/ma7053634>
- Romero, R. X. (2015). *Diseño de una planta de recuperación del sulfato de cromo (III) proveniente de las aguas del proceso de curtido de cromo, mediante*

- electrocoagulación y reacción química. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11844>
- Ruiz, M., Mayorga, C., Mantilla, L., & López, P. (2016). *Gestión Económica Ambiental Del Sector Curtiembre de Ambato*. Augusto Guzzo Revista Académica, 1(17), 133-142. <https://doi.org/10.22287/ag.v1i17.330>
- Saha, R., Nandi, R., & Saha, B. (2011). Sources and toxicity of hexavalent chromium. *Journal of Coordination Chemistry*, 64(10), 1782-1806. <https://doi.org/10.1080/00958972.2011.583646>
- Salas, G. (2012, marzo 30). *Eliminación de sulfuros por oxidación en el tratamiento del agua residual de una curtiembre*. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química, 8(1), 49-54. Recuperado de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/5152>
- Shim, H. Y., Lee, K. S., Lee, D. S., Jeon, D. S., Park, M. S., Shin, J. S., ... Shim, H. Y. (1990). Application of Electrocoagulation and Electrolysis on the Precipitation of Heavy Metals and Particulate Solids in Washwater from the Soil Washing. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 3, 130-138. <https://doi.org/10.4236/jacen.2014.34015>
- Silva, P., María, R., Lamela, C., Carmenaty, C., Adrián, D., & Naranjo, T. (2014). Adsorción de Cr(VI) por Cocos nucífera L. en residuales de Fibrocemento en Santiago de Cuba Cr(VI) adsorption by Cocos nucífera L. in wastewater of fibrocement from Santiago de Cuba ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN Introducción. *Colomb. Biotecnol* (Vol. XVI).
- Sjöström, E. (1993). *Wood chemistry: fundamentals and applications* (2.^a ed.). Academic Press Inc. Recuperado de <https://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=NCkXBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=wood+classification+by+lignin+containing&ots=eKmhS-qCW3&sig=2BRxAU6KpbGAJX5GI0VyULoyqT0#v=onepage&q=lignin&f=false>
- Sundar, J., Ramesh, R., Rao, P. S., Saravanan, P., Sridhamath, B., &

- Muralidharan, C. (2001). *Water Management in Leather Industry*. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 60, 443-450. Recuperado de http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/26498/1/JSIR_60%286%29_443-450.pdf
- Tayupanda, S. (2010). *Diseño de un Sistema de Tratamiento de agua residual del proceso de pelambre para su reutilización*, *Curtiembre Piel* "Puma" Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2650/1/96T00123.pdf>
- Téllez, J., Carvajal, M., & Gaitán, A. (2004, enero 1). *Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembre*. *Revista de la Facultad de Medicina Universidad Nacional de Colombia*, 52(1), 50-61. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revfacmed/article/view/43297>
- Tejeda, L., Tejada, C., Marimón, W., & Villabona, Á. (2014). *ESTUDIO DE MODIFICACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DE BIOMASA (Citrus sinensis Y Musa paradisiaca) PARA LA ADSORCIÓN DE METALES PESADOS EN SOLUCIÓN*.
- ToxUse Reduction Institute. (2006). *Five Chemicals Alternatives - Assessment Study*. Recuperado de https://www.turi.org/About/News/Press_Releases/Press_Release_Archive/UMass_Lowell_s_Toxics_Use_Reduction_Institute_Five_Chemicals_Study_Reveals_Practical_Alternatives_for_Massachusetts_Industry_and_Consumers/2006_Five_Chemicals_Alternatives_Assessment_Stu
- Vassilis, I., & Stavros, P. (2006). *Adsorption, Ion Exchange and Catalysis - Design of Operations and Environmental Applications (1.^a ed.)*. Amsterdam: Elsevier North Holland.
- Weber, W. J., & Borchardt, Ja. A. (1979). *Control de la calidad del agua: procesos fisicoquímicos*. Reverté.

- Worch, E. (2012). *Adsorption technology in water treatment: fundamentals, processes, and modeling*. De Gruyter.
- Wu, Y., Zhang, S., Guo, X., & Huang, H. (2008). Adsorption of chromium(III) on lignin. *Bioresource Technology*, 99(16), 7709-7715. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.01.069>
- Xavier, M., Logeswari, A., Mano, S., Thirumarimurugan, M., & Kannadasan, T. (2013). Removal of Chromium from Real Tannery Effluent by Using Bioadsorbents. *Research Inventy: International Journal Of Engineering And Science*, 2(7), 35-40. Recuperado de <http://www.researchinventy.com/papers/v2i7/F027035040.pdf>
- Yogeshwaran, V., & Priya, A. (2017). Removal of Hexavalent Chromium (Cr 6+) Using Different Natural Adsorbents-A Review. *Journal of Chromatography Separation Techniques*, 8(6), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2157-7064.1000392>
- Zayed, A. M., & Terry, N. (2003). Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. *Plant and Soil*, 249(1), 139-156. <https://doi.org/10.1023/A:1022504826342>

ANEXOS

**ANEXO I. PROCEDIMIENTOS PARA CARACTERIZAR EL
MATERIAL**

a) Humedad

- Pesar dos muestras de 2 gramos de semilla de mora.
- Secar las muestras durante 24 horas, en una estufa previamente calentada a 105°C, posteriormente enfriar en un desecador por 20 minutos hasta alcanzarla temperatura ambiente.
- Pesar las muestras y registrar el valor.

b) Lignina

- Pesar dos gramos de semilla de mora en un crisol previamente tarado.
- Secar la muestra en una estufa durante 2 horas a 105°C.
- Colocar las muestras en un desecador por 20 minutos hasta alcanzarla temperatura ambiente.
- Trasladar la muestra a un vaso de precipitación con tapa y mientras se mezcla, agregar lentamente, 15 ml de H₂SO₄ (72%), manteniendo la agitación constante durante un minuto.
- Dejar reposar la mezcla durante 2 horas.
- Lavar el material en un matraz Erlenmeyer de 1 L y cubrir el material con una concentración de 3% el H₂SO₄, llevar a ebullición durante 4 horas con ayuda de un baño maría y procurar mantener el volumen del agua constante, añadiendo agua perdida en la evaporación cuando sea necesario.
- Dejar reposar y sedimentar el material insoluble.
- Filtrar la muestra con ayuda de una placa filtrante, y lavar el recipiente con agua caliente.
- Secar la muestra en la estufa a 105°C durante 2 horas, y posteriormente enfriar en un desecador.
- Reportar los resultados como porcentaje en masa de lignina en madera no extraída y sin humedad.

c) Holocelulosa

- Pesar 2 gramos de semilla de mora en un Erlenmeyer.
- Añadir 100 ml de NaOH al 1% de concentración.
- Llevar a baño maría durante una hora y cubrir con un vidrio reloj.
- Filtrar la muestra con ayuda de una placa filtrante.
- Lavar la muestra con agua destilada.
- Lavar con 50 ml de ácido acético al 10%.
- Lavar con 100 ml de agua destilada caliente.
- Secar la muestra en una estufa a 105°C durante 12 horas y posteriormente dejar enfriar en un desecador.
- Pesar y reportar el valor como porcentaje de hemicelulosa.

d) Celulosa

- Pesar 1 gramo de holocelulosa en un Erlenmeyer.
- Agregar 5 ml de una solución de NaOH 17.5% a 20°C en baño maría durante 2 minutos.
- Agregar 2.5 ml de NaOH 17.5% cada 5 minutos hasta completar los 12.5 ml durante 30 minutos a temperatura ambiente.
- Mezclar a 20°C durante 45 minutos.
- Calentar 16 ml de agua destilada a 20°C y agregar a la mezcla.
- Agitar la mezcla durante 1 hora.
- Filtrar la mezcla con ayuda de una placa filtrante.
- Colocar 25 ml de una solución de NaOH 8.3% y posteriormente lavar con agua destilada.
- Repetir el literal anterior.
- Apagar la bomba de succión y añadir 7.5 ml de ácido acético al 10%.
- Retirar el ácido y dejar la muestra semi descubierta durante 3 minutos.

- Lavar con agua destilada y llevar a secar en una estufa durante 12 h, posteriormente dejar enfriar en un desecador.
- Pesar y reportar el valor como porcentaje de celulosa.

e) Hemicelulosa

- Pesar 2 g de semilla de mora en un Erlenmeyer.
- Añadir 100 ml de NaOH al 1% de concentración.
- Llevar a baño maría durante una hora y cubrir con un vidrio reloj, mezclar con un agitador a los 10, 15 y 25 minutos.
- Filtrar la muestra con ayuda de una placa filtrante.
- Lavar la muestra con 100 ml de agua destilada caliente.
- Lavar con 50 ml de ácido acético al 10%.
- Lavar con 100 ml de agua destilada caliente.
- Secar la muestra en una estufa a 105°C durante 12 horas y posteriormente dejar enfriar en un desecador.
- Pesar y reportar el valor como porcentaje de hemicelulosa.

**ANEXO II. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE LAS ISOTERMAS DE LANGMUIR Y
FREUNDLICH**

a) **Tiempo de equilibrio**

Tabla 2A Datos experimentales para la determinación del tiempo de equilibrio

Tiempo (Minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	q _e (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,00	00,00
20	1,84	0,38	67,55
40	1,11	0,46	80,42
60	0,65	0,50	88,54
80	0,51	0,52	91,01
100	0,46	0,52	91,89
120	0,41	0,53	92,77
140	0,41	0,53	92,77
160	0,41	0,53	92,77
180	0,41	0,53	92,77

b) **Construcción de isotermas**

Tabla 2B Datos experimentales para la construcción de las isotermas

Concentración inicial de Cr (VI) (mg/L)	Concentración final de Cr (VI) (mg/L)	Volumen (L)	Masa de adsorbente (g)	q _e (mg/g)	Remoción (%)
5,67	0,41	1	10,0035	0,53	92,77
5,67	0,42	1	9,0007	0,58	92,59
5,67	0,72	1	7,0012	0,71	87,28
5,67	0,92	1	5,0041	0,95	83,77
5,67	1,55	1	3,0009	1,37	72,66
5,67	3,26	1	1,0027	2,40	42,50

c) **Cálculos para la construcción de la Isoterma de Langmuir**

Tabla 2C Datos experimentales para la construcción de la Isoterma de Langmuir

1/C _e (L/mg)	2,439	2,381	1,389	1,087	0,645	0,307
1/q _e (g/mg)	1,902	1,714	1,417	1,053	0,728	0,416

$$y = 0,3274 + 0,6386x$$

$$y = \frac{1}{q_{max} * b} + \left(\frac{1}{q_{max}}\right) C_e$$

i. Cálculo de q_{max} :

$$\frac{1}{q_{max}} = 0,6386$$

$$q_{max} = 1,566$$

ii. Cálculo de b

$$\frac{1}{q_{max} * b} = 0,3274$$

$$b = \frac{1}{(1,566)(0,3274)}$$

$$b = 1,95$$

d) Cálculos para la construcción de la isoterma de Freundlich

Tabla 2D Datos experimentales para la construcción de la Isoterma de Freundlich

log Ce	-0,387	-0,377	-0,143	-0,036	0,190	0,513
log qe	-0,279	-0,234	-0,151	-0,023	0,138	0,381

$$y = 0,0005 + 0,7184 x$$

$$\log y = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

i. Cálculo de k_F

$$\log k_F = 0,0005$$

$$k_F = (10)^{0,0005}$$

$$k_F = 1,001$$

ii. Cálculo de ***n***

$$\frac{1}{n} = 0,7184$$

$$n = 1,399$$

**ANEXO III. CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE
LA SEMILLA DE MORA**

a) Cálculo del contenido de humedad

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{masa inicial} - \text{masa seca})}{\text{masa seca}} * 100$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(2,0007 - 1,9551)}{1,9551} * 100$$

$$\% \text{ Humedad} = 2,33\%$$

$$\% \text{ Humedad promedio} = \frac{\text{muestra 1} + \text{muestra 2} + \text{muestra 3} + \text{muestra 4}}{4}$$

$$\% \text{ Humedad promedio} = \frac{2,33\% + 2,28\% + 2,18\% + 2,19\%}{4}$$

$$\% \text{ Humedad promedio} = 2,24 \%$$

b) Cálculo del contenido de lignina

$$\% \text{ Lignina} = \frac{\text{Masa lignina (g)}}{\text{Masa seca (g)}} * 100$$

$$\% \text{ Lignina} = \frac{0,5481 \text{ g}}{1,9578 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ Lignina} = 27,99 \%$$

$$\% \text{ Lignina promedio} = \frac{\text{muestra 1} + \text{muestra 2}}{2}$$

$$\% \text{ Lignina promedio} = 28,83 \%$$

c) Cálculo del contenido de holocelulosa

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{\text{Masa seca} - \text{Masa Holocelulosa}}{\text{Masa seca}} * 100$$

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{1,9628 - 1,0479}{1,9628} * 100$$

$$\% \text{ Holocelulosa} = 46,61 \%$$

$$\% \text{ Holocelulosa promedio} = \frac{46,61 \% + 43,01 \%}{2}$$

$$\% \text{ Holocelulosa promedio} = 44,81 \%$$

d) Cálculo del contenido de celulosa

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{\text{Masa seca} - \text{Masa celulosa}}{\text{Masa seca}(g)} * 100$$

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{1,9592 - 1,0866 \text{ g}}{1,9592 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ Celulosa} = 44,54 \%$$

$$\% \text{ Celulosa promedio} = \frac{44,54 \% + 42,88 \%}{2}$$

$$\% \text{ Celulosa promedio} = 28,83 \%$$

e) Cálculo del contenido de hemicelulosa

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \frac{\text{Masa seca} - \text{Masa hemicelulosa}}{\text{Masa seca}} * 100$$

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \frac{1,9568 - 1,2936}{1,9568} * 100$$

$$\% \text{ Hemicelulosa} = 33,89 \%$$

$$\% \text{ Hemicelulosa promedio} = \frac{33,89 \% + 30,73 \%}{2}$$

$$\% \text{ Hemicelulosa promedio} = 32,31 \%$$

**ANEXO IV. DATOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE
ADSORCIÓN**

a) Tamaño de partícula

Tabla 4A Datos experimentales para la variación del tamaño de partícula

Tamaño de partícula (μm)	Masa de adsorbente (g)	Concentración inicial de Cr (VI) (mg/L)	Concentración final de Cr (VI) (mg/L)	q_e (mg/g)	Remoción (%)
425	10,0035	5,67	0,41	0,526	92,77
300	10,0027	5,67	0,94	0,473	83,42
212	10,0012	5,67	2,84	0,282	49,91

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4B Datos experimentales para tamaño de partícula de 212 μm

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	q_e (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	4,63	0,104	18,34
40	3,99	0,168	29,63
60	3,43	0,224	39,51
80	3,03	0,264	46,56
100	2,87	0,280	49,38
120	2,84	0,283	49,91

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4C Datos experimentales para tamaño de partícula de 300 μm

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	q_e (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	2,96	0,271	47,80
40	2,13	0,354	62,43
60	1,60	0,407	71,78
80	1,32	0,435	76,72
100	1,10	0,457	80,60
120	0,94	0,473	83,42

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4D Datos experimentales para tamaño de partícula de 425 μm

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	q _e (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	1,84	0,383	67,55
40	1,11	0,456	80,42
60	0,65	0,502	88,54
80	0,51	0,516	91,01
100	0,46	0,521	91,89
120	0,41	0,526	92,77

Elaborado por: Bermúdez, 2018

b) Masa de adsorbente

Tabla 4E Datos experimentales para la variación de dosis de adsorbente

Masa de adsorbente (g)	Concentración inicial de Cr (VI) (mg/L)	Concentración final de Cr (VI) (mg/L)	q _e (mg/g)	Remoción (%)
10,0035	5,67	0,41	0,53	92,77
9,0007	5,67	0,42	0,58	92,59
5,0041	5,67	0,92	0,95	83,77
3,0009	5,67	1,68	1,33	70,37
1,0027	5,67	3,26	2,40	42,50

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4F Datos experimentales para dosis de adsorbente de 1 gramo

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	q _e (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	4,50	0,117	20,63
40	4,12	0,155	27,34
60	4,05	0,162	28,57
80	3,99	0,168	29,63
100	3,52	0,215	37,92
120	3,26	0,241	42,50

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4G Datos experimentales para dosis de adsorbente de 3 gramos

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	4,28	0,139	24,51
40	3,69	0,198	34,92
60	3,14	0,253	44,62
80	3,07	0,260	45,86
100	2,29	0,338	59,61
120	1,68	0,399	70,37

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4H Datos experimentales para dosis de adsorbente de 5 gramos

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	2,42	0,325	57,32
40	1,91	0,376	66,31
60	1,40	0,427	75,31
80	1,23	0,444	78,31
100	1,00	0,467	82,36
120	0,92	0,475	83,77

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4I Datos experimentales para dosis de adsorbente de 9 gramos

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	1,76	0,391	68,96
40	1,09	0,458	80,78
60	0,08	0,559	98,62
80	0,60	0,507	89,42
100	0,43	0,524	92,42
120	0,42	0,525	92,59

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4J Datos experimentales para dosis de adsorbente de 10 gramos

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	1,84	0,383	67,55
40	1,11	0,456	80,42
60	0,65	0,502	88,54
80	0,51	0,516	91,01
100	0,46	0,521	91,89
120	0,41	0,526	92,77

Elaborado por: Bermúdez, 2018

c) pH

Tabla 4K Datos experimentales para la variación de pH

pH	Masa de adsorbente (g)	Concentración inicial de Cr (VI) (mg/L)	Concentración final de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
2,7	10,0016	5,67	0,14	0,543	97,53
3	10,0007	5,67	0,37	0,530	93,47
4	10,0021	5,67	0,39	0,527	93,12

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4L Datos experimentales para pH de 2,7

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	0,82	0,485	85,54
40	0,25	0,542	95,59
60	0,15	0,552	97,35
80	0,15	0,552	97,35
100	0,15	0,552	97,35
120	0,14	0,553	97,53

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4M Datos experimentales para pH de 3

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	0,96	0,471	83,07
40	0,70	0,497	87,65
60	0,56	0,511	90,12
80	0,37	0,530	93,47
100	0,37	0,530	93,47
120	0,37	0,530	93,47

Elaborado por: Bermúdez, 2018

Tabla 4N Datos experimentales para pH de 4

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	5,67	0,000	0,00
20	1,50	0,417	73,54
40	0,77	0,490	86,42
60	0,50	0,517	91,18
80	0,40	0,527	92,95
100	0,39	0,528	93,12
120	0,39	0,528	93,12

Elaborado por: Bermúdez, 2018

d) Concentración inicial de Cr (VI)

Tabla 4O Datos experimentales de la remoción de Cr (VI) usando semilla de mora para una variación de la concentración inicial de cromo

Tiempo (minutos)	Concentración de Cr (VI) (mg/L)	qe (mg/g)	Remoción (%)
0	58,50	0,000	0,00
20	0,90	1,920	98,46
40	0,29	1,940	99,50
60	0,25	1,941	99,57
80	0,24	1,942	99,59
100	0,24	1,942	99,59

120	0,24	1,942	99,59
-----	------	-------	-------

Elaborado por: Bermúdez, 2018

e) Humedad

Tabla 4P Contenido de humedad de la semilla de mora

Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Humedad (%)
2,0007	1,9551	2,33
2,0049	1,9603	2,28
2,0010	1,9583	2,18
2,0005	1,9576	2,19

Elaborado por: Bermúdez, 2018

f) Lignina

Tabla 4Q Contenido de lignina en la semilla de mora

Masa inicial (g)	Masa seca (g)	Masa lignina (g)	Lignina (%)
2,0007	1,9578	0,5481	27,99
2,0048	1,9781	0,5866	29,65

Elaborado por: Bermúdez, 2018

g) Holocelulosa

Tabla 4R Contenido de holocelulosa en la semilla de mora

Masa inicial (g)	Masa seca (g)	Masa holocelulosa (g)	Holocelulosa (%)
2,0070	1,9628	1,0479	46,61
2,0026	1,9585	1,1161	43,01

Elaborado por: Bermúdez, 2018

h) Celulosa

Tabla 4S Contenido de celulosa en la semilla de mora

Masa inicial (g)	Masa seca (g)	Masa celulosa (g)	Celulosa (%)
-------------------------	----------------------	--------------------------	---------------------

2,0033	1,9592	1,0866	44,54
2,0019	1,9579	1,1183	42,88

Elaborado por: Bermúdez, 2018

i) Hemicelulosa

Tabla 4T Contenido de hemicelulosa en la semilla de mora

Masa inicial (g)	Masa seca (g)	Masa hemicelulosa (g)	Hemicelulosa (%)
2,0009	1,9568	1,2936	33,89
2,0033	1,9592	1,3571	30,73

Elaborado por: Bermúdez, 2018

ANEXO V. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 5 a Semilla de mora lavada



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 b Secado natural de la semilla de mora



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 c Pesado de la semilla de mora para su caracterización



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 d Determinación de hemicelulosa en la semilla de mora



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura A I Determinación de holocelulosa en la semilla de mora



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 e Determinación de celulosa en la semilla de mora



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 f Determinación de la dosis de adsorbente óptima



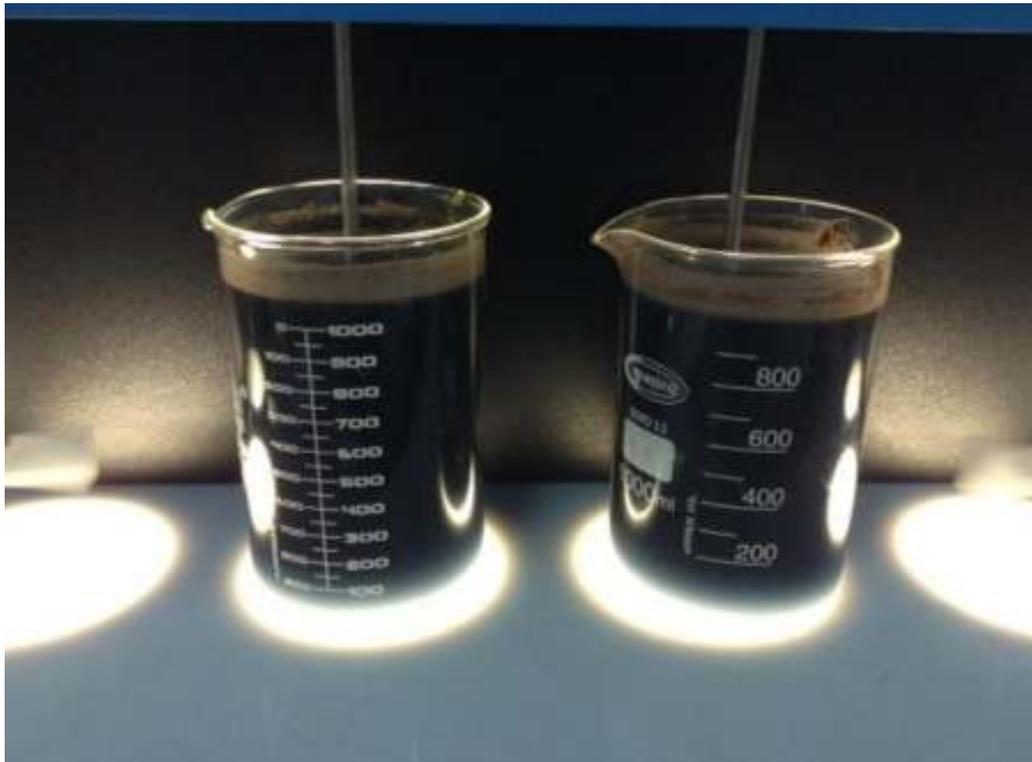
Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 g Determinación del pH óptimo



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 h Prueba realizada en la muestra de agua de curtiembre



Elaborado por: Bermúdez, 2018

Figura 5 i Determinación de Cr (VI): Reacción colorimétrica



Elaborado por: Bermúdez, 2018